

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEURE ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI OUZOU
FACULTE DES SCIENCES
DEPARTEMENT DE CHIMIE



THESE DE DOCTORAT LMD

Spécialité : Chimie des Matériaux et de l'Environnement

Présentée par :

ZEGHAD MOHAMED

Thème

Recyclage des déchets inorganiques dans les nouveaux bétons : bétons autoplaçants (BAP), bétons fibrés ultra-hautes performances (BFUHP)

Devant le jury composé de :

Président	AZEM Said	Professeur	UMMTO
Rapporteur	SAFI Brahim	Maitre de Conférences A	Univ. Boumerdes
Co-Rapporteur	MAZARI Tassadit	Maitre de Conférences A	UMMTO
Examineur	GHERNOUTI Youcef	Professeur	Univ. Boumerdes
Examineur	BOURAS Rachid	Maitre de Conférences A	UMMTO

Soutenue le : 21 / 04 / 2018

Remerciements

*En préambule à cette thèse, je souhaite adresser ici mes remerciements à notre créateur (**DIEU**) pour nous avoir donné de la force à accomplir ce travail.*

*Mes premiers remerciements iront à mon directeur de thèse Mr. **Safi Brahim**, pour l'implication qu'il a pu avoir tout au long de ce projet, son suivi, ses conseils et ses orientations sans oublier ses qualités humaines formidables, son soutien permanent et son expérience dont j'ai eu l'honneur de profiter à de nombreuses reprises.*

*Je tiens à exprimer également toute ma gratitude à ma co-directrice de thèse Mme **Mazari Tassadit** pour ses aides, conseils et critiques objectives.*

*Ensuite le Professeur à l'université de Tizi Ouzou Mr **AZEM Saïd** qui a bien voulu présider le jury de soutenance ainsi que tous les membres des jurys, pour l'honneur qu'ils me font en acceptant d'examiner mon projet de recherche et pour leur bienveillante attention.*

*J'en profite l'occasion de remercier tous ceux qui ont participé de près ou de loin à ce travail. Je pense notamment à tout le personnel du l'unité de recherche (Matériaux, procédés et environnement **UR-MPE**), le personnel du Centre d'Etudes et de services Technologiques de l'Industrie des Matériaux de construction (**CETIM**) et sans oublier enfin le personnel de département de l'environnement de l'université technique de **Zvolen (Slovaquie)**.*

*Enfin, j'adresse mes sincères remerciements à tous mes proches et amis qui m'ont toujours soutenu et encouragé au cours de la réalisation de ma thèse de doctorat, je pense plus particulièrement à mes chers parents, à ma tendre fiancée **Hasina**, à mes frères : **Noureddine** et **Ahmed** et à mes sœurs : **Samira**, **Lila**, **Chahira** et **Hamida**.*

RESUME

L'élimination des déchets inorganiques est un enjeu important en Algérie. Une des solutions proposée est d'envisager l'utilisation de ces déchets comme agrégats légers dans les bétons et comme complément cimentaire (remplacement totale des charges fines). Dans le cadre de la formulation des nouveaux bétons, un grand volume d'addition est nécessaire de manière à réduire la quantité du ciment induite par l'augmentation du volume de pâte nécessaire pour permettre l'écoulement du béton.

Les travaux présentés dans ce document portent sur l'incorporation de trois différents déchets. La première étude porte sur un béton autoplaçant élaboré à partir des granulats légers à base de mousse de verre en appliquant un traitement thermique adéquat. Le recyclage de ces déchets a été fait en remplaçant le sable par des granulats fins de mousse de verre à des rapports massiques (0, 30, 50 et 100%). Dans la seconde étude, des bétons autoplaçants ont été préparés en utilisant des coquilles de mer comme addition minérale en substitution totale ou partielle du sable et ensuite comme un complément cimentaire, alors que dans la dernière partie, les déchets de briques réfractaires broyés et le sable de dune finement broyé ont été recyclés en tant qu'additions cimentaires complémentaires en substitution totale de la fumée de silice pour produire un nouveau béton dit (béton fibrés ultra hautes performances).

Les essais de caractérisation rhéologique (fluidité, écoulement et ségrégation) et physico-mécanique (densité et résistance mécanique) ont été effectués sur tous les bétons étudiés. En comparant les résultats obtenus aux caractéristiques d'un béton témoin (sans substitution), et en déterminant les caractéristiques essentielles des bétons étudiés à l'état frais et à l'état durci, on a pu évaluer les potentialités ainsi que les performances des différents types de déchets à être incorporés dans les nouveaux bétons : bétons fibrés ultra hautes performances et bétons autoplaçants.

Mots clés : béton - mortier - béton autoplaçant - mousse de verre - briques réfractaires - coquilles de mer - béton fibré - déchets - résistance à la compression - résistance à la flexion.

ABSTRACT

The reuse of inorganic waste is an important issue in Algeria. One of the proposed solutions is to consider the use of these wastes as light aggregates in concrete and as a cement supplement (total replacement of fine fillers). In the context of the formulation of new concretes, a large volume of addition is necessary in order to reduce the quantity of cement induced by the increase in the volume of cement past (necessary to allow the flow of the concrete).

The work presented in this document focuses on the incorporation of three different wastes. The first study is about a self-compacting concrete made from lightweight glass foam aggregates with a suitable heat treatment. The recycling of this waste was done by replacing sand with a fine granulates of glass foam at mass ratios (0, 30, 50 and 100%). In the second study, a self-compacting concretes were prepared using sea shells as a mineral addition in total or partial substitution of the sand and then as a cementitious supplement, whereas in the latter part, the wastes of crushed refractory bricks and dune sand (finely ground) were recycled as complementary cementitious additives in total substitution of the silica fume, to produce a new concrete called ultra-high performance fiber concrete.

The rheological characterization tests (flow and segregation) and physico-mechanical (density and mechanical strength) were carried out on all the studied concretes. By comparing the results obtained with the characteristics of a control concrete (without substitution), and by determining the essential characteristics of the studied concrete in the fresh state and the hardened state, it was possible to evaluate the potentialities and the performances of the different Types of waste to be incorporated in new concrete: ultra-high performance fiber concretes and self-compacting concretes.

Key-words: concrete - mortar - self-compacting concrete - glass foam - refractory bricks - sea shells - fiber concrete - wastes - compressive strength - flexural strength.

SOMMAIRE

RESUME.....	3
LISTE DES FIGURES.....	11
LISTE DES TABLEAUX.....	13
LISTES DES SYMBOLES ET NOTATIONS	15
INTRODUCTION GENERALE.....	18
Chapitre 1 : Généralités sur les bétons	20
I.LE BETON ORDINAIRE	21
I.1 La composition d'un béton ordinaire	21
I.1.1 Le ciment	21
I.1.2 Les granulats.....	22
I.1.3 L'eau.....	23
I.1.4 Les adjuvants	23
I.1.5 Les ajouts minéraux.....	24
I.2 La classification des bétons.....	26
I.3 Effets des ajouts cimentaires sur les propriétés du béton frais.....	27
I.3.1 La demande en eau	27
I.3.2 L'ouvrabilité	27
I.3.3 La ségrégation et le ressuage	27
I.3.4 La chaleur d'hydratation.....	28
I.3.5 Le temps de prise	28
I.3.6 Le retrait plastique	28
I.4 Effets des ajouts cimentaires sur les propriétés du béton durci.....	28
I.4.1 La résistance	28
I.4.2 La perméabilité et l'absorption.....	29
I.4.3 Le retrait au séchage et le fluage.....	29
I.4.4 La carbonatation	29
I.4.5 La corrosion des armatures.....	30
II. LE BETON AUTOPLACANT	30
II.1 Définition	30
II.2 Composition.....	30
II.2.1 Le ciment.....	31
II.2.2 L'eau.....	31
II.2.3 Les granulats	31
II.2.4 Les ajouts minéraux	32

II.2.5 Les Superplastifiants	33
II.3 Concept du béton autoplaçant	33
II.3.1 Le rôle de la pâte	34
II.3.2 Le rôle des adjuvants	34
II.4 Classification.....	34
II. 5 Propriétés	35
II.5.1 L'ouvrabilité.....	35
II.5.2 La résistance mécanique.....	37
II.5.3 Le module d'élasticité statique (en compression)	38
II.5.4 Le retrait au jeune âge et à l'état durci	38
II.5.5 Les déformations et le fluage	38
II.5.6 Les propriétés physico-chimiques et durabilité.....	39
III. BETONS FIBRES ULTRA HAUTES PERFORMANCES	39
III.1 Introduction	39
III.2 Définition.....	40
III.3 Composition.....	41
III.3.1 Le ciment	41
III.3.2 La fumée de silice	42
III.3.3 Le sable	42
III.3.5 Les fibres.....	45
III.4 Principes de formulation des BFUHP	46
III.5 Les propriétés des BFUHP	48
III.5.1 Le comportement rhéologique	48
III.5.2 Le comportement mécanique des BFUHP.....	49
III.5.3 Le comportement des fibres dans les BFUHP	51
III.6 Effets différés du BFUHP.....	53
III.6.1 Le retrait.....	53
III.6.2 Le fluage	53
III.6.3 Absorption d'eau.....	53
III.6.4 L'autocicatrisation des fissures.....	54
III.6.5 Le traitement thermique	54
III.6.6 La microstructure et durabilité des BFUHP.....	54
III.6.7 Les applications des BFUHP	55
CONCLUSION	56
Chapitre 2 : Les déchets minéraux utilisés dans les bétons.....	58

I. LES DECHETS DE VERRE	59
I.1 Introduction	59
I.2 Structure et composition chimique du verre	59
I.3 Propriétés du verre	60
I.3.1 Propriétés physiques	60
I.3.2 Propriétés mécaniques	61
I.3.3 Propriétés électriques.....	61
I.3.4 Fragilité.....	62
I.3.5 Propriétés chimiques.....	62
I.3.6 Réactions alcali-silice (RAS).....	62
I.3.7 Réaction pouzzolanique.....	63
I.4 Le verre de récupération.....	64
I.5 La mousse de verre.....	64
I.5.1 Définition.....	64
I.5.2 Les granulats de mousse de verre	64
I.5.3 Principes de fabrication et composition chimique des mousses de verre	65
I.5.4 Les caractéristiques des granulats de mousse de verre	66
I.5.5 L'utilisation des granulats de mousse de verre dans le béton.....	66
II. DECHETS DE BRIQUES REFRACTAIRES	67
II.1 Définition	67
II. 2 Domaine d'utilisation.....	68
II.3 Principaux types de briques réfractaires	68
II.3.1 Brique ordinaire.....	68
II.3.2 Brique poreuse.....	69
II.3.3 Briques d'argiles creusées à perforations	69
II.5 Les caractéristiques physico-chimiques des briques réfractaires.....	70
III. LE SABLE DE DUNE	70
III.1 Introduction	70
III.2 Définition d'un sable de dune.....	71
III.3 Caractéristique des sables de dune	71
III.4 Utilisation des sables de dune dans les bétons	72
VI. LA FUMEE DE SILICE	73
V. LES DECHETS MARINS (LES COQUILLES DE MER)	73
V.1 Minéralogie et structure de la coquille	73
V.1.1 Biominéraux calcitiques.....	74

V.1.2 Biominéraux aragonitiques	75
V.1.3 Les constituants organiques	75
V.3 Recyclage des coquilles de mer	76
V.4 Recyclage des coquilles de mer dans les bétons.....	76
VI. CONCLUSION	77
Chapitre 3 : Recyclage des déchets de verre dans les mortiers autoplacants	79
I. INTRODUCTION	80
II. OBJECTIFS.....	80
III. CARACTERISTIQUES ET IDENTIFICATION DES MATERIAUX UTILISES DANS CETTE ETUDE	80
III.1 Le ciment	80
III.2 Le filler de calcaire	82
III.3 Le superplastifiant	82
III.4 Le sable.....	82
III.5 Les granulats de mousse de verre	84
III.5.1 Élaboration des granulats de mousse de verre	84
III.5.2 Les caractéristiques de la mousse de verre	85
III.5.3 La microstructure des granulats de la mousse de verre	86
VI. FORMULATION DES MORTIERS AUTOPLACANTS	86
VI.1 La méthode de mortier de béton équivalent (MBE).....	87
VI.2 Protocole de mélange des mortiers autoplacants (MAP)	87
VI.3 Conduite d'essai	88
VI.3.1 A l'état frais	88
VI.3.2 A l'état durci	88
V. RESULTATS ET INTERPRETATIONS	89
V.1 Caractérisation de mortier à l'état frais	89
V.1.1 La fluidité des mortiers (l'essai d'étalement)	89
V.2 Caractérisation de mortier à l'état durci	90
V.2.2 La porosité et l'absorption de l'eau.....	91
V.2.3 Contrôle non destructif par ultrason	92
V.2.4 La résistance à la flexion.....	93
V.2.5 La résistance à la compression.....	93
V.2.6 Le module d'élasticité dynamique	94
V.2.7 Étude de l'interface (granulats / matrice cimentaire).....	95
IV. CONCLUSION	95

Chapitre 4 : Recyclage des coquilles de mer dans les bétons autoplacants	97
I. INTRODUCTION	98
II. CARACTERISTIQUES ET IDENTIFICATION DES MATERIAUX UTILISES	98
II.1 Le ciment	98
II.2 Fillers de calcaire	99
II.3 Sable.....	99
II.4 Superplastifiant	100
II.5 Eau de gâchage	100
II.6 Coquilles de mer	100
II.6.1 Caractéristiques des coquilles de mer	100
II.6.2 Etude microstructurale des coquilles de mer.....	102
II.6.3 Analyse chimique de coquille de mer et fillers de calcaire par fluorescence X...	102
II.6.4 Analyse thermique ATD et ATG	102
II.6.5 Préparation des coquilles de mer.....	103
III. FORMULATION DES BETONS AUTOPLACANTS	104
VI. METHODES D'ESSAI.....	104
V. RESULTATS ET INTERPRETATIONS	106
V.1 Propriétés à l'état frais	106
V.1.1 La fluidité des BAP.....	106
V.1.2 Le flux de béton	106
V.2 Les propriétés à l'état durci	107
V.2.1 La densité apparente.....	107
V.2.3 Le module d'élasticité dynamique.....	109
V.2.4 Aspect macroscopique des bétons étudiés	109
IV. CONCLUSION	110
Chapitre 5 : Recyclage et valorisation des déchets de brique réfractaire dans les bétons spéciaux.....	112
I. INTRODUCTION	113
II. CARACTERISTIQUES ET IDENTIFICATION DES MATERIAUX UTILISES	114
II.1 Le ciment	114
II.1.1 Caractéristiques physiques	115
II.1.2 Caractéristiques chimique et minéralogiques.....	116
II.1.3 Caractéristiques mécaniques	116
II.2 Le sable de dune.....	117
II.3 Les poudres fines	118

II.3.1 La fumée de silice (FS)	118
II.3.2 Le sable de dunes (S.D) broyé	118
II.3.3 La brique réfractaire broyée (BRB)	119
II.4 Eau de gâchage	119
II.5 Les adjuvants	119
II.6 Les fibres.....	119
III. FORMULATION DES BETONS.....	119
VI. RESULTATS ET INTERPRETATIONS	120
VI.1 Propriétés de BFUHP à l'état frais	120
VI.1.1 La fluidité des bétons.....	120
VI.2 Propriétés de BFUHP à l'état durci	122
VI.2.1 La masse volumique apparente.....	122
VI.2.2 Résistance mécanique des bétons	123
V. COMPARAISON ENTRE LES BETONS ELABORES.....	127
IV. CONCLUSION.....	129
CONCLUSION GENERALE	130
PERSPECTIVES.....	132
References bibliographiques	133

LISTE DES FIGURES

FigureI.1 : Différents constituants du béton ordinaire.	21
FigureI.2 : Diagramme récapitulatif des ajouts minéraux :.....	26
FigureI.3 : Différence entre les BAP et les BO.....	31
FigureI.4 : Choix de la granularité pour un BAP	32
FigureI.5 : Dispersion par répulsion électrostatique	44
FigureI.6 : Dispersion par répulsion stérique	44
FigureI.7 : Représentation du comportement rhéologique des BFUHP	47
FigureI.8 : Courbes typiques de la résistance en compression : (a) d'un béton ultra hautes performances sans fibres métalliques, et (b) d'un béton fibré ultra hautes performances.	50
FigureI.9 : Evolution en fonction de la température de module d'élasticité du Ductal et du BSI.....	51
Figure1-10 : Défiance de section polie de BFUHP et Béton classique	55
FigureII.1 : Briques pleines et perforées.....	68
FigureII.2 : Briques creusées comprimées par voie demi-humide	69
FigureII.3 : Courbe granulométrique des différents échantillons de sable de dune	72
FigureII.4 : Exemple de coquille de bivalve ayant une couche calcitique et une couche aragonitique : 1, 2 et 3 : la croissance de la coquille.....	74
FigureII.5 : La microscopie optique (a) et électronique à balayage (b) d'une coquille calcitique	75
FigureII.6 : La microscopie optique (a) et électronique à balayage (b) d'une coquille aragonitique.....	75
FigureIII.1 : Granulats de la mousse de verre obtenus après le traitement thermique	85
FigureIII.2 : Fluidité des mortiers autoplacants en fonction du taux de substitution du sable par la mousse de verre.....	90
FigureIII.3 : Masse volumique apparente des MAP en fonction du taux de substitution du sable par la mousse de verre.....	91
FigureIII.4 : Evolution de la porosité des mortiers autoplacants en fonction du taux de substitution du sable par la mousse de verre	92
FigureIII.5 : Evolution de l'absorption de l'eau en fonction du taux de substitution du sable	92
FigureIII.6 : Histogramme de la vitesse de propagation longitudinale du son.....	93
FigureIII.7 : Evolution de la résistance à la traction par flexion des MAP en fonction du taux de substitution du sable par la mousse de verre	93
FigureIII.8 : Evolution de la résistance à la compression des MAP en fonction du taux de substitution du sable par la mousse de verre	94
FigureIII.9 : Images MEB du mortier de référence et MAP (100%).....	95
FigureIV.1 : Coquilles de mer utilisées dans cette étude	100
FigureIV.2 : Analyse granulométrique du sable et coquille 0/5	101
FigureIV.3 : Microstructure en différents types d'éléments	102
FigureIV.4 : Analyses ATD-ATG des coquilles de mer.....	103
FigureIV.5 : Étapes de préparation des coquillages écrasés	103
FigureIV.6 : Essai d'écoulement des échantillons de béton	105
FigureIV.7 : Fluidité et le temps d'écoulement des bétons étudiés	106
FigureIV.8 : Essai d'écoulement et la mise en œuvre du béton.....	107

FigureIV.9 : Evolution de la masse volumique mesurée à 28 jours.....	107
FigureIV.10-a : Evolution de la résistance à la flexion mesurée à 7 et à 28 jours.....	108
Figure IV.10-b : Evolution de la résistance à la compression mesurée à 7 et à 28 jours.....	109
FigureIV.11 : Module élastique dynamique (Ed) des bétons (mesuré à 28 jours).....	109
FigureIV.12 : Images prises sur des échantillons de béton à 28 jours....	110
FigureV.1 : Granulométrie du sable de Boussaâda	117
FigureV.2 : Fluidité des différents bétons étudiés à base de CEM I.....	121
FigureV.3 : Masse volumique apparente des différents bétons étudiés	122
FigureV.4 : Résistance à la compression et à la flexion du béton témoin.....	124
FigureV.5 : Résistance à la compression et à la flexion du béton BI.....	125
FigureV.6 : Résistance à la compression et à la flexion du béton BII	126
FigureV.7 : Résistance à la compression et à la flexion du béton BIII	127
FigureV.8 : Effet de la nature des poudres fines sur le développement de la résistance mécanique : (a) à la compression (b) à la flexion	128

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : Composition des constituants du béton en poids et en volume.....	21
Tableau I.2 : Classification des bétons.....	26
Tableau I.3 : Propriétés d'ouvrabilité des BAP et les moyens de mise en œuvre.....	37
Tableau I.4 : Catégories des adjuvants selon la norme (NF EN 934-2).....	43
Tableau I.5 : Caractéristiques de fibres utilisées dans les BFUHP	45
Tableau I.6 : Malaxage de BFUHP fabriqué en laboratoire.....	48
Tableau II.1 : Valeurs de densité des différents types de verre.....	60
Tableau II.2 : Propriétés physique du verre.....	61
Tableau II.3 : Quelques caractéristiques des granulats du verre expansé.....	66
Tableau II.4 : Caractéristiques générales de la fumée de silice.....	73
Tableau III.1 : Caractéristiques physiques du ciment.....	81
Tableau III.2 : Caractéristiques mécaniques du ciment.....	81
Tableau III.3 : Composition chimique du ciment.....	81
Tableau III.4 : Composition minéralogique du ciment.....	81
Tableau III.5 : Analyse chimique du calcaire.....	82
Tableau III.6 : Propriétés physiques du calcaire.....	82
Tableau III.7 : Analyse minéralogique du calcaire.....	82
Tableau III.8 : Composition chimique du sable.....	83
Tableau III.9 : Composition minéralogique du sable.....	83
Tableau III.10 : Caractéristiques physiques du sable.....	83
Tableau III.11 : Analyse granulométrique (par tamisage) du sable lavé.....	83
Tableau III.12 : Caractéristiques chimiques du calcin.....	84
Tableau III.13 : Caractéristiques physiques du calcin.....	84
Tableau III.14 : Composition chimique de la mousse de verre.....	85
Tableau III.15 : Caractéristiques physiques de la mousse de verre.....	85
Tableau III.16 : Analyse granulométrique par tamisage de la mousse de verre.....	85
Tableau III.17 : Composition du BAP pour 1 m ³ selon la méthode japonaise.....	86
Tableau III.18 : Composition de MAP (0%) pour 1 m ³ selon la méthode MBE.....	87
Tableau III.19 : Module élastique dynamique des mortiers étudiés.....	94

Tableau IV.1 : Caractéristiques physiques du ciment.....	98
Tableau IV.2 : Résistance à la compression et la flexion du ciment selon NF EN 196-1.....	99
Tableau IV.3 : Composition chimique du ciment par fluorescence X.....	99
Tableau VI.4 : Composition minéralogique du ciment par diffraction des rayons X.....	99
Tableau IV.5: Analyse chimique du calcaire par fluorescence X.....	99
Tableau IV.6 : Caractéristiques physiques du sable (0/5) selon la norme NF EN 933-1.....	100
Tableau IV.7 : Caractéristiques physiques du déchet de la coquille de mer.....	101
Tableau IV.8 : Analyse chimique de la coquille par fluorescence X.....	101
Tableau IV.9: Composition des bétons étudiés (Kg/m ³).....	104
Tableau V.1 : Caractéristiques physique du ciment.....	115
Tableau V.2 : Composition chimique de CEM I.....	116
Tableau V.3 : Composition minéralogique de CEMI.....	116
Tableau V.4: Résistances à la compression et à la flexion de CEMI.....	116
Tableau V.5 : Caractéristiques physiques du sable de Boussaâda.....	117
Tableau V.6 : Analyse chimique du sable de Boussaâda.....	118
Tableau V.7 : Analyse chimique du sable de dune broyé.....	118
Tableau V.8 : Analyse granulométrique du sable de dune broyé.....	118
Tableau V.9 : Analyse chimique de brique réfractaire broyée.....	119
Tableau V.10 : Analyse granulométrique de brique réfractaire broyée.....	119
Tableau V.11 : Composition des différents types de bétons étudiés.....	120
Tableau V.12: Caractéristiques des bétons étudiés à l'état frais.....	121
Tableau V.13 : Résultats des essais mécaniques du béton témoin.....	123
Tableau V.14 : Résultats des essais mécaniques du béton I.....	125
Tableau V.15 : Résultats des essais mécaniques du béton II.....	125
Tableau V.16 : Résultats des essais mécaniques du béton III.....	126

LISTES DES SYMBOLES ET NOTATIONS

CSH : Silicate de calcium hydraté

E/C : Eau/Ciment

Mpa : Mega pascal

Gpa: Giga pascal

E/L : Eau/Liant

BAP : Béton autoplaçant

BO : Béton ordinaire

AFGC: Association française de génie civile

G/S: Gravier/Sable

BFUHP: Béton fibré ultra haute performance

BHP: Béton haute performance

C₃A: Aluminates tricalcique

C₃S: Silicates tricalcique

C₂S: Silicates bicalcique

C₄AF: Aluminoferrite tétra calcique

PNS: Polynaphtalènes sulfonates

PMS: Polymélamines sulfonates

PA : Polyacrylates

PC : Polycarboxylates

MEB : Microscopie électronique à balayage

Mf : Module de finesse

CNERIB : Centre national d'études et de recherches intégrées du bâtiment

PAF : Perte au feu

MBE : Mortier de béton équivalent

DRX : Diffraction des rayons x

MAP : Mortier autoplaçant

P : Porosité d'éprouvette

Ma : Masse d'éprouvette après l'immersion dans l'eau pendant 28 jours

Ms : Masse sèche de l'éprouvette

V vide : Volume de vide

Ab : Absorption de l'éprouvette

Ed : Module élastique dynamique

Rc : Résistance en compression

Rf : Résistance en flexion

ρ : Densité de l'échantillon

V : Vitesse du son

ASTM: American society for testing and materials

MAP (0%) : Mortier autoplçant non substitué

MAP (30%) : Mortier autoplçant avec une substitution de 30 % du sable par la mousse de verre

MAP (50%) : Mortier autoplçant avec une substitution de 50 % du sable par la mousse de verre

MAP (100%) : Mortier autoplçant avec une substitution totale du sable par la mousse de verre

SSB : Surface spécifique selon la méthode de Blaine

ATD : Analyse thermodifférentielle

ATG : Analyse thermogravimétrique

BAP1 : Béton autoplçant témoin

BAP2 : Béton autoplçant sans fillers calcaire substitué par les coquillages finement écrasés

BAP3 : Béton autoplçant avec fillers calcaire substitué par les coquillages écrasés

BAP4 : Béton autoplçant sans fillers calcaire substitué par les coquillages finement écrasés et les coquillages écrasés

BAP5 : Béton autoplçant avec fillers calcaire et sans aggregats fins

BAP6: Béton autoplçant sans fillers calcaire et sans aggregats fins

SDB: Sable de dune broyé

BRB: Brique réfractaire broyée

BDBR1: Béton avec les déchets de briques réfractaires à base d'alumine

BDBR2: Béton avec les déchets de briques réfractaires à base de magnésium

BDBR3: Béton avec les déchets de briques réfractaires à base Silica-Zirconium

SDF : Sable de dune finement broyé

SD : Sable de dune

FS : Fumé de silice

FP : Fibres de polypropylène

SP : Superplastifiant

BT : BFUHP témoin à base de la fumée de silice.

BI (SDB) : BFUHP à base de sable de dunes broyé.

BII (BRB) : BFUHP à base de brique réfractaire.

BIII (MIX) : BFUHP à base de (SDB ET BRB)

INTRODUCTION GENERALE

Dans une vision de préservation de l'environnement et du développement durable, il est devenu nécessaire d'explorer et d'étudier toutes les possibilités de valorisation et de recyclage des déchets et sous-produits industriels notamment dans le domaine des matériaux et du génie civil. Ainsi, il convient de trouver des utilisations adéquates à ces déchets tels que leur valorisation dans le matériau béton. En particulier, les déchets minéraux qui sont actuellement utilisés dans la technologie des bétons soit comme ajouts minéraux (par substitution partielle du ciment) ou comme granulats fins ou grossiers (par substitution des granulats traditionnels).

C'est dans ce contexte que s'inscrit cette présente étude qui a comme objectif principal la contribution au recyclage et à la valorisation des déchets inorganiques en particulier ; les déchets de l'industrie de verre (déchets de verre et déchets de brique réfractaire) et les déchets marins tels que les coquilles de mer dans la fabrication de certains bétons spéciaux permettant ainsi de les éliminer ou au moins de les minimiser. En plus de la protection de l'environnement, cette initiative conduit aussi à résoudre certains problèmes liés au manque de granulats à savoir les granulats traditionnels (sable et gravillon).

Ce travail suit une démarche associant les étapes suivantes : sélection du déchet, caractérisation, tests, analyses et expériences sur ces déchets puis interprétation des résultats. La première étape consiste à présenter et sélectionner certains déchets inorganiques en particulier les déchets minéraux suivit de leur recyclage en tant qu'ajout (comme ajout minéral) ou granulats (fins ou grossier) dans la formulation de certains bétons spéciaux à savoir les bétons autoplaçants et les bétons fibrés hautes performances, dans la seconde étape. Ensuite, des essais de caractérisation de ces bétons seront effectués afin de qualifier la potentialité apportée par ces déchets aux propriétés des bétons étudiés.

Ainsi, le présent manuscrit est subdivisé en cinq chapitres, dont la partie bibliographique (théorique) est présentée dans les deux premiers chapitres et le travail expérimental (tests, caractérisations, résultats et discussion) fait l'objet des trois autres chapitres.

Le **chapitre I** est consacré aux généralités sur les bétons en générale en tant que matériau de construction. Le **chapitre II**, traite des notions sur les déchets inorganiques tels que les déchets minéraux (verre, brique réfractaire et les coquilles de mers). Dans ce même chapitre, un état de l'art sera présenté sur l'utilisation de ces déchets dans le domaine du génie civil.

Tandis que le **chapitre III** présente le recyclage et la valorisation de déchets de verre. Le déchet de verre sera utilisé pour fabriquer des granulats de mousse de verre. Ces derniers seront préparés à partir de la poudre de verre (calcin) et un agent moussant (calcaire) selon le traitement thermique appliqué pour la fabrication de mousse de verre (850°C pendant 20min). Après la préparation des granulats légers, des mortiers autoplaçants seront élaborés à base des granulats fins (sable), puis d'autres variantes de mortiers autoplaçants en substituant le sable par les granulats de mousse de verre à des rapports (0, 30, 50 et 100% en volume).

Le **chapitre IV** traite le volet de déchets d'origines marines qui sont les coquilles de mer. Ces dernières seront utilisées comme ajout minéral et granulats fins dans la formulation des bétons nouveaux comme les bétons autoplaçants. Et cela, d'une part, par l'utilisation de coquilles de mer concassées en tant que granulat fin dans les bétons et d'autre part par la substitution du fillers de calcaire par les coquilles de mer finement broyées en tant qu'ajout fin.

Enfin, le **chapitre V** sera consacré aux déchets de brique réfractaire de l'industrie verrière. Ces déchets seront utilisés comme ajout fin par une substitution totale de la fumée de silice pour produire un béton de qualité tel que le béton fibré hautes performances. Dans ce chapitre, les déchets de brique réfractaire seront préparés comme ajout minérale fin (finement broyé) à une finesse très élevée.

Les résultats des différents essais réalisés et leurs interprétations, seront traités dans chaque volet du travail expérimental.

La conclusion générale reprend l'ensemble des résultats expérimentaux à la lumière du concept du développement durable.

Chapitre 1 : Généralités sur les bétons

Le présent chapitre traite des généralités sur les bétons dont les constituants des bétons, leurs propriétés essentielles et les bétons spéciaux. Les connaissances sur les bétons spéciaux, leurs particularités du point de vue propriétés à l'état frais ainsi que leurs méthodes de formulation seront présentées dans ce chapitre. Egalement, un état de l'art sur les mortiers autoplacants et les bétons fibrés ultra hautes performances sera présenté dans ce même chapitre

I. LE BETON ORDINAIRE

Le béton est un composite hétérogène multiphasique constitué d'un mélange intime de : granulats, sable, pâte (ciment + eau) qui représente 25 à 40 % du volume totale du béton et de produits additionnels (adjuvants+ additions minérales,...). (01)

Dans les bétons ordinaires (*Figure I.1*), les granulats sont des grains de pierre, sable, gravier, cailloux et le liant est un ciment, généralement un ciment portland. Si le type de liant utilisé n'est pas un ciment, on parle alors, selon le liant utilisé, de béton de résine, de béton d'hydrocarboné, de béton d'argile, etc.

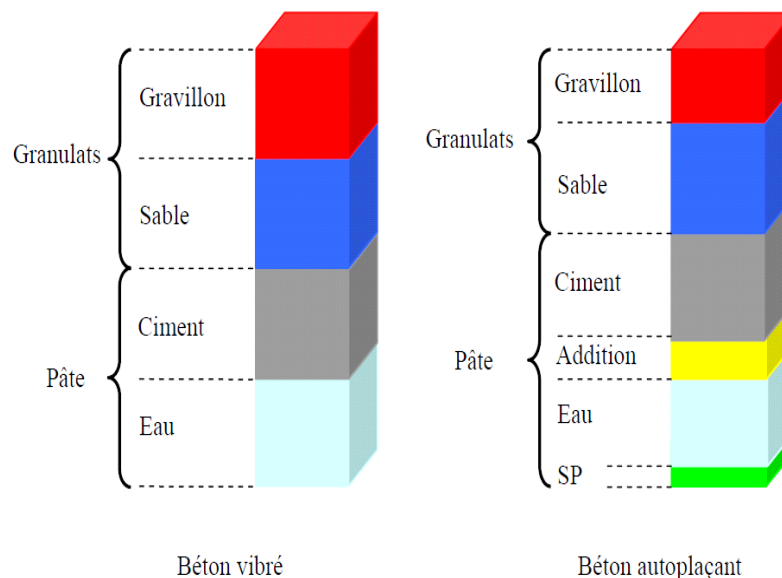


Figure I.1 : Différents constituants du béton ordinaire.

I.1 La composition d'un béton ordinaire

L'ordre de grandeur des proportions des constituants d'un béton courant sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau I.1: Composition des constituants du béton en poids et en volume

	Eau	Air	Ciment	Granulats
Volume	14 – 22 %	1 – 6 %	7 – 14 %	60 – 78 %
Poids	5- 9 %	/	9 – 18 %	63 – 85 %

I.1.1 Le ciment

Le ciment est un liant hydraulique, une fois mélangé avec de l'eau, donne des produits dotés de bonne résistance mécanique et chimique.

Il existe divers types de ciment (02):

-Le ciment Portland : le plus répandu parmi les liants hydrauliques, est un mélange de gypse et de clinker. Le clinker est un produit obtenu par cuisson vers 1450° d'un mélange approprié de calcaire et d'argile. Pendant ce durcissement, le ciment diminue de volume et provoque des fissures (retraits).

-Le ciment Portland (CEM I): obtenu par dosage précis de chaux, silice, alumine et fer, utilisé dans la maçonnerie et dans les bétons courants.

- Le ciment Portland composé (CEM II) : obtenu par ajout de cendres pouzzolaniques ou autres dans sa composition, utilisé pour maçonner des surfaces étanches à l'eau (murs de caves, murs de fondations, quais,...).

-Le ciment de haut fourneau (CEM III) : obtenu par ajout de laitier de haut fourneau (oxydes métalliques), il est de meilleure résistance vis-à-vis des corrosions chimiques. Il est utilisé pour des ouvrages en contact avec des acides ou de l'eau de mer.

- Le ciment composé (CEM V) : c'est un mélange de ciment Portland, de laitier de haut fourneau et de pouzzolanes.

I.1.2 Les granulats

Ensemble des grains inertes (sable, graviers et cailloux) dont l'origine peut être naturels ou artificielle. Ils forment le squelette du béton. La nature, la forme et la granularité des granulats influencent fortement les propriétés des bétons à l'état frais et durci.

Toutefois, les granulats doivent être chimiquement stables lors du contact avec les autres constituants. Ainsi, le choix de l'agrégat s'avère être très important pour obtenir un béton avec de bonnes caractéristiques.

Dans le béton frais, les granulats servent au remplissage de l'espace (ils occupent environ 70 % de volume). De plus, en raison de leur porosité ouverte, ils peuvent absorber une certaine quantité d'eau (effet de mouillage). Dans le béton durci, les granulats apparaissent comme des incursions dures. Ils ont un rôle important dans la résistance mécanique et dans la consistance du béton.

Les granulats sont classés selon (03) :

- La composition minéralogique : (quartzite, calcite ou basalte).
- La forme (ou la procédure de fabrication) : Des granulats roulés dragués du lit de rivière ou des granulats concassés élaborés à partir des roches exploitées en carrière.

- La granularité (ou la distribution dimensionnelle des grains) : la courbe granulométrique des granulats doit être continue en sorte que les petits grains puissent bien remplir les vides créés par les grains ayant une taille plus grande. Par ailleurs, un rapport optimal de (gravillon/sable) permet d'obtenir une meilleure compacité des granulats.

1.1.3 L'eau

C'est un composant nécessaire pour la formation des matériaux cimentaires. L'eau dans la pâte de ciment hydraté est contenue sous différentes formes, notamment sous forme d'eau libre, adsorbée et liée. Elle a essentiellement deux fonctions : une fonction physique, qui confère au béton frais les propriétés rhéologiques d'un liquide (permettant donc son écoulement et son moulage), et une fonction chimique en tant que liant de la poudre de ciment. Elle sert aussi à mouiller les agrégats, et donc à assurer un bon lien avec la pâte de ciment.

Néanmoins, elle peut aussi présenter des caractéristiques négatives : Les eaux ne doivent contenir ni composé risquant d'attaquer chimiquement le ciment, les granulats ou les armatures, ni particules en suspension dont la quantité pourrait modifier ses qualités originales. Cependant, celle restant en excès dans les pores est responsable de certains phénomènes tels que le retrait de dessiccation ou encore l'éclatement du béton en cas de gel.

En général toutes les eaux potables peuvent être utilisées pour la production du béton ; l'eau de mer, même si elle est agressive vis-à-vis du ciment durci, peut être utilisée pour la fabrication d'un béton non armé.

1.1.4 Les adjuvants

Ce sont des produits chimiques, incorporés au béton frais en faible quantités, permettant d'améliorer certaines de ses propriétés. On distingue essentiellement les adjuvants accélérateurs ou retardateurs de prise, les adjuvants réducteurs d'eau (plastifiant) et hauts réducteurs d'eau (super plastifiant ou fluidifiant).

Les adjuvants les plus utilisés sont (04):

- ***Les retardateurs/accélérateurs de prise*** : Les retardateurs de prise sont des molécules organiques qui empêchent la nucléation du CSH. L'effet inverse est obtenu grâce aux accélérateurs de prise.

- ***Les plastifiants (ou fluidifiants)*** : ce sont les adjuvants les plus utilisés dans la production du béton. Ils ont la propriété de rendre plus facile la maniabilité du béton et de réduire fortement la quantité d'eau de gâchage et d'augmenter donc la résistance du béton (en diminuant le rapport E/C).

- **Les super plastifiants** : sont des adjuvants à haut pouvoir de réduction d'eau. Ils permettent ainsi d'obtenir un béton plus résistant, et de réduire la teneur en eau de 25 à 35% tout en gardant une même maniabilité.

- **Les entraîneurs d'air** : Ils sont à base de molécules tensioactives qui permettent l'amélioration de la résistance au gel du béton.

- **Les hydrofuges** : Ils sont des produits repoussant l'eau qui protègent le béton de la pénétration de l'eau pour des pressions très basses (comme c'est le cas lors des pluies).

- **Les fluidifiants** : Ils sont des macromolécules organiques de synthèse chargés négativement, qui ont une propriété dispersante. Ils agissent en s'adsorbant sur les particules de ciment par la diminution des forces de Van der Waal ou la diminution de l'énergie superficielle du minéral ou bien en créant des forces de répulsion électrostatique.

I.1.5 Les ajouts minéraux

Les ajouts minéraux sont des matières premières naturelles, artificielles, sous-produits d'une autre industrie, résidus industriels ou déchets industriels polluants, ils sont ajoutés soit au mélange de matières premières avant le broyage, soit à la farine crue, soit au clinker portland avant ou après le broyage, leurs pourcentages dans la masse varient suivant le but de l'addition et le rôle qu'elle peut jouer, ainsi on trouve des ajouts en faibles, moyennes ou en fortes teneurs.

Il existe deux types d'ajouts selon leurs origines (05):

- **Les fines inertes** : améliorent la compacité et la consistance des bétons notamment dans le cas des bétons autoplacants qui nécessitent une forte teneur en fines.

- **Les fines actives** : ont un caractère pouzzolanique et entrent en réaction avec l'oxyde de calcium en formant des hydroxydes de calcium (les cendres volantes, la fumée de silice, les laitiers de haut fourneau,...), ils sont des particules de faible diamètre, utilisées pour des raisons économiques ou pour améliorer certaines propriétés et ajoutées en quantités de l'ordre de 10 % du poids de ciment.

On trouve trois types d'ajout :

I.1.5.1 Ajouts inertes

Eléments naturels ou artificiels chimiquement inertes qui ne jouent aucun rôle dans le processus de fabrication, d'hydratation, ou de durcissement du ciment mais peuvent modifier les propriétés finales du produit. Ils sont moins connus dans la pratique de l'industrie cimentière, utilisés habituellement, lorsque la cimenterie ne dispose pas de source d'ajouts

minéraux actifs, constitués de roches carbonates tel que : le calcaire, la craie, la dolomite, et le sable quartzeux, ils sont largement utilisés en tant qu'ajouts naturels inertes dans le béton comme le calcaire.

Le calcaire : Le calcaire est une roche sédimentaire, provenant essentiellement de dépôt des organismes au fond des mers depuis 80 millions d'années, se trouve sous différentes formes (marbre, calcaire dure, craie, dolomite etc).

I.5.1.2 Ajouts minéraux actifs naturels

Ils peuvent être :

D'origine sédimentaire (les diatomites, les tripolis et les gaizes) : ces roches sont parfois souillées par des sables, des argiles et des inclusions carbonatées, leur masse volumique varie entre 400 et 1000 (Kg/m³). Les gaizes sont des roches sèches et compactes tandis que les diatomites et les tripolis présentent plutôt des taux d'humidité élevés.

D'origine volcanique (la pouzzolane, les tufs, la pierre ponce) : telles que les pouzzolanes naturelles qui sont des cendres volcaniques dont l'utilisation et les propriétés liantes étaient connues à partir de l'époque romaine. Leur composition chimique est proche de celle des cendres volantes, mais elles sont produites à haute température par les éruptions volcaniques.

I.5.1.3 Ajouts minéraux actifs artificiels

Parmi ces minéraux on peut citer les déchets siliciques actifs, les argiles cuites (argiles cuites, déchets de briques et de tuiles), les poussières formées lors de la cuisson des argiles expansées, les cendres de combustibles et mâchefers et les laitiers métallurgiques.

Les ajouts minéraux actifs, les plus utilisés actuellement dans le béton sont :

La pouzzolane : De nature siliceuse non hydraulique par elle-même, mais à des températures ordinaires peut se combiner avec la chaux en présence d'eau, pour donner naissance à des composés peu solubles dotés de propriétés cémenteuses. L'activité pouzzolanique est assurée par la réaction chimique en solution entre la silice provenant de la dissolution d'une poudre siliceuse et l'hydroxyde de calcium Ca(OH)_2 produit par l'hydratation du ciment et donne par la suite le silicate de calcium hydraté (C—S—H). Elle dépend de nombreux facteurs à savoir : la composition chimique et minéralogique, l'état de division, et la structure à l'état de surface.

Le laitier du haut fourneau : c'est une matière siliceuse obtenue par fusion au cours des différents traitements industriels visant principalement l'extraction ou purification des métaux.

Le laitier est un sous-produit de la fabrication de la fonte en haut fourneau. Le laitier vitreux possède une structure riche en énergie, c'est un liquide surfondu qui conserve, du fait de la trempe, une énergie de cristallisation non dissipée qui va lui permettre d'être hydraulique.

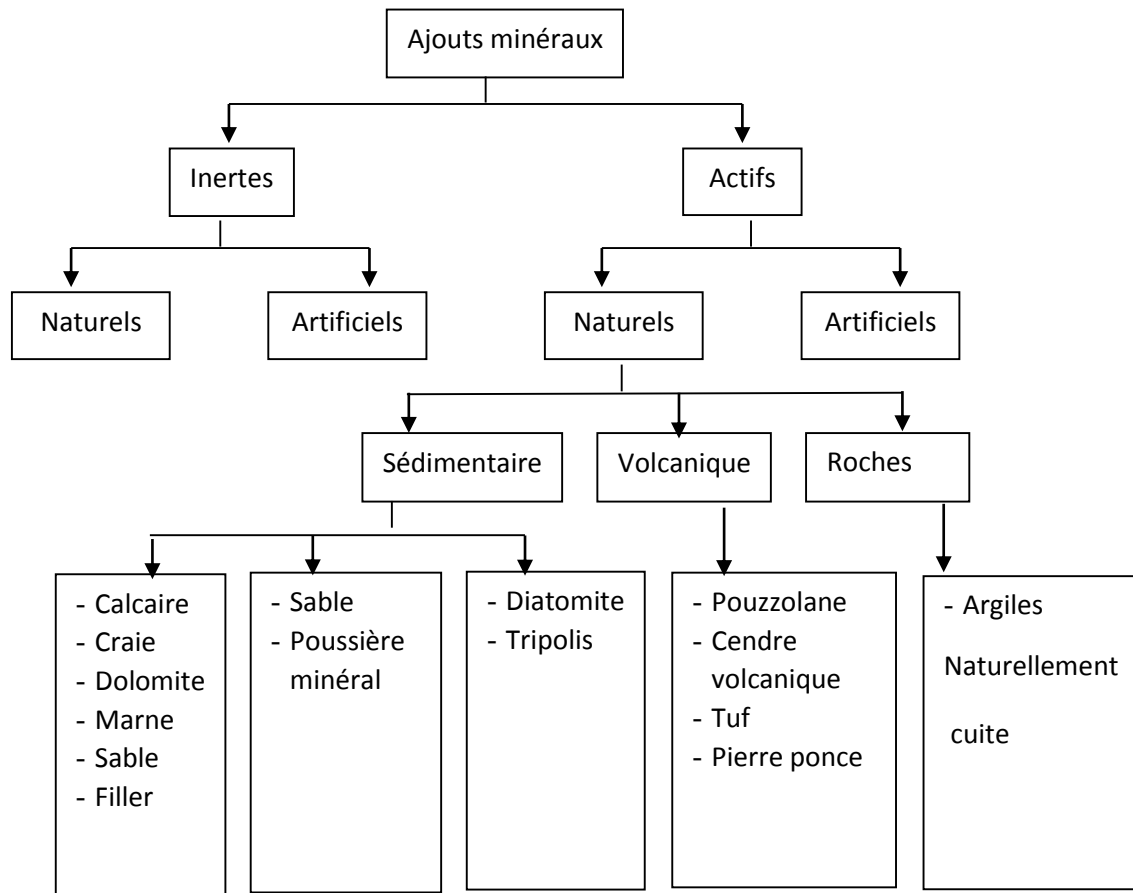


Figure I.2 : Diagramme récapitulatif des ajouts minéraux

I.2 La classification des bétons

Les bétons sont classés (*Tableau I.2*) selon leur résistance mécanique, leur masse volumique et leur résistance au gel (non gélivité) (06).

Tableau I.2: Classification des bétons

La résistance mécanique		La masse volumique		Non gélivité (résistance au gel)	
Béton ordinaire	< 50 Mpa	Béton extra lourd	>2500 Kg/m ³	Béton lourd	Entre 5 et 30 Mpa
Béton à haute performance	Entre 50 et 80 Mpa	Béton lourd	Entre 1800 et 2500 Kg/m ³		
Béton à très haute performance	Entre 80 et 150 Mpa	Béton léger	Entre 500 et 1800 Kg/m ³	Béton léger	Entre 1 et 20 Mpa
Béton exceptionnel	> 150 Mpa	Béton extra léger	< 500Kg/m ³		

I.3 Effets des ajouts cimentaires sur les propriétés du béton frais

I.3.1 La demande en eau

Les mélanges de béton contenant des cendres volantes nécessitent généralement, à affaissement égal, moins d'eau que le béton ne contenant que du ciment Portland (environ 1 à 10 % de moins que le dosage normal). Des dosages plus élevés peuvent mener à de plus grandes réductions d'eau. Toutefois, certaines cendres volantes peuvent engendrer une augmentation de la demande en eau, pouvant atteindre 5 % (07). Ces dernières, réduisent la demande en eau de la même manière que les agents réducteurs d'eau liquides (08). En revanche, le laitier broyé diminue généralement la demande en eau de 1 à 10 %, selon le dosage.

En l'absence de réducteur d'eau ou de superplastifiant, la demande en eau du béton contenant de la fumée de silice augmente avec l'augmentation de la quantité de fumée de silice. L'argile calcinée, le schiste calciné et le métakaolin utilisés à des dosages normaux ont généralement peu d'effet sur la demande en eau. Cependant, les autres pouzzolanes naturelles peuvent augmenter ou diminuer de façon significative la demande en eau.

I.3.2 L'ouvrabilité

La cendre volante, le laitier, l'argile calcinée et le schiste calciné améliorent généralement l'ouvrabilité des bétons d'affaissement semblable. Les fumées de silice peuvent contribuer à rendre le mélange collant et un ajustement du mélange, y compris l'utilisation d'un agent réducteur d'eau, peut être nécessaire pour maintenir la maniabilité et avoir une meilleure finition.

I.3.3 La ségrégation et le ressuage

Les bétons utilisant des cendres volantes présentent en général moins de ségrégation et de ressuage. Ceci en rend l'emploi particulièrement avantageux dans les bétons fabriqués avec des granulats déficients en particules fines. Le ressuage plus faible est principalement dû à la demande en eau plus faible des bétons avec cendres volantes. Les auteurs ont montré qu'il existe une corrélation entre la diminution du ressuage du béton et la demande en eau plus faible des mortiers avec cendres volantes (07).

Toutefois, les bétons faisant appel à des laitiers granulés broyés de finesse égale à celle du ciment tendent à ressuer davantage que les bétons qui n'en contiennent pas, mais cela ne semble pas avoir d'effet défavorable sur la ségrégation. D'un autre côté, les fumées de silice et les laitiers broyés plus fins que le ciment sont très efficaces pour réduire le ressuage et la ségrégation. En revanche, l'argile et le schiste calciné ainsi que le métakaolin ont peu d'effet sur le ressuage.

1.3.4 La chaleur d'hydratation

Les cendres volantes, les pouzzolanes naturelles et le laitier broyé réduisent la quantité de chaleur qui s'accumule dans une structure du béton en raison de leur chaleur d'hydratation moins élevée que celle du ciment Portland. Il est à noter que la chaleur d'hydratation de certaines pouzzolanes correspond à seulement 40 % de celle du ciment, ce qui est particulièrement avantageux dans le cas du béton employé dans les structures massives. Les fumées de silice ont aussi un effet sur la chaleur d'hydratation.

1.3.5 Le temps de prise

L'utilisation de cendres volantes et de laitier de haut fourneau granulé broyé allonge généralement le délai de prise du béton. Le degré de retard de la prise dépend de facteurs tels que la quantité de ciment portland et d'eau requise, le type et la réactivité du laitier, le dosage en pouzzolane et la température du béton. Un retard de la prise peut s'avérer avantageux durant la saison chaude, puisqu'il laisse plus de temps pour la mise en place et à la finition du béton. Cependant, durant la saison froide, certains matériaux peuvent engendrer un important retard de prise pouvant retarder très significativement les opérations de finition. L'argile et le schiste calciné ont peu d'effet sur le temps de prise.

1.3.6 Le retrait plastique

Du fait de ses faibles caractéristiques de ressuage, le béton qui contient de la fumée de silice peut développer davantage des fissures de retrait plastique. On évite ce problème en veillant à bien protéger le béton du dessèchement durant et après la fabrication. Les pouzzolanes et le laitier ont en général peu d'effet sur la fissuration causée par le retrait plastique. Les ajouts cimentaires qui augmentent de façon significative le temps de prise peuvent augmenter le risque de fissuration causée par le retrait plastique.

1.4 Effets des ajouts cimentaires sur les propriétés du béton durci

1.4.1 La résistance

Les cendres volantes, le laitier de haut fourneau granulé broyé, l'argile calcinée, le métakaolin, le schiste calciné, et la fumée de silice contribuent au gain de résistance du béton. Cependant, pour les bétons contenant des ajouts cimentaires, le taux d'accroissement de la résistance en compression en fonction du temps sera souvent différent de celui des bétons qui ne contiennent que du ciment portland. Les résistances en traction-flexion, sont modifiées de la même manière que la résistance en compression. (09)

En raison de la lente réaction pouzzolanique de certains ajouts cimentaires, il peut être nécessaire d'assurer une cure humide ininterrompue et des températures de maturation

favorables plus longtemps que normal. Le béton contenant de la fumée de silice souffre toutefois moins sous ce rapport et sa résistance à un jour égale ou excède généralement à celle d'un mélange témoin ne faisant appel qu'au ciment. La fumée de silice contribue au développement de la résistance surtout entre 3 et 28 jours, période pendant laquelle la résistance d'un béton à la fumée de silice dépasse celle d'un béton témoin.

La résistance des bétons fabriqués avec certaines cendres volantes fortement réactives, surtout les cendres de type CH à forte teneur en calcium ou avec des laitiers broyés peut égaler ou excéder celle du mélange témoin dans un délai de 1 à 28 jours. Certaines cendres volantes et pouzzolanes naturelles demandent souvent jusqu'à 90 jours pour atteindre ou dépasser la résistance d'un mélange témoin à 28 jours, selon le dosage du mélange.

Il est très important d'utiliser les cendres volantes comme ajout, plutôt qu'en remplacement partiel du ciment pour améliorer le développement de la résistance par temps froid. Les gains de résistance plus lents qui résultent de l'utilisation de certains ajouts cimentaires présentant un avantage pour la construction par temps chaud puisqu'ils permettent plus de temps pour la mise en place et la finition du béton avec un ajustement approprié du mélange.

1.4.2 La perméabilité et l'absorption

Avec une cure suffisante, les cendres volantes, le laitier broyé et les pouzzolanes naturelles réduisent en général la perméabilité et l'absorption du béton. La fumée de silice et le métakaolin sont particulièrement efficaces à cet égard. Les essais indiquent que la perméabilité du béton diminue au fur et à mesure que la quantité de liants hydratés augmente et que le rapport E/L diminue. L'absorption est à peu près la même pour le béton à cendres volantes que pour le béton sans cendres, même si certaines cendres peuvent réduire l'absorption de 20 % ou plus.

1.4.3 Le retrait au séchage et le fluage

Employés en quantités faibles à modérées, les cendres volantes, le laitier granulé broyé, l'argile ou le schiste calciné et la fumée de silice ont généralement peu d'effet et d'importance pratique sur la contraction au séchage et sur le fluage du béton.

1.4.4 La carbonatation

La carbonatation du béton est un processus par lequel le gaz carbonique de l'air pénètre dans le béton. Elle abaisse l'alcalinité du béton, un facteur important qui protège l'acier d'armature de la corrosion. La carbonatation augmente considérablement dans les bétons à fort

rapport (E/L), à faible teneur en ciment, à courte période de maturation, à faible résistance et à pâte très perméable ou poreuse. On rapporte qu'à dosage normal, la fumée de silice, les laitiers granulés et les cendres volantes accroissent la carbonatation mais d'une quantité minimale dans les bétons mûris à l'humidité pendant une courte période.

1.4.5 La corrosion des armatures

Certains ajouts cimentaires tels que, les cendres volantes et les fumées de silice réduisent la corrosion de l'acier par diminution de la perméabilité à l'eau, à l'air et aux ions chlorure d'un béton bien mûri tout en augmentant considérablement la résistivité électrique, atténuant ainsi la réaction électrochimique de corrosion. Ainsi, le béton contenant de la fumée de silice ou du métakaolin est souvent utilisé pour les revêtements et les dalles pleine épaisseur sur les ponts et dans les structures de stationnement.

II. LE BETON AUTOPLACANT

Ces dernières années, une nouvelle génération de béton a vu le jour : les bétons autoplaçant (BAP). Ils sont très fluides et se mettent en œuvre sous le seul effet de la gravité, donc sans apport de vibration interne ou externe même dans des coffrages complexes et très encombrés, tout en donnant un produit final homogène.

II.1 Définition

Par définition, un béton autoplaçant (BAP) est un béton très fluide, homogène et stable, qui se met en place par gravitation et sans vibration. Il ne doit pas subir de ségrégation et doit présenter des qualités comparables à celles d'un béton vibré classique. Le terme de béton autonivelant peut aussi être utilisé mais il concerne plutôt des applications horizontales (dallage par exemple). Ces bétons présentent plusieurs propriétés qui justifient l'intérêt nouveau que leur portent les industriels.

II.2 Composition

Les constituants d'un BAP sont le ciment, les fines (les ajouts minéraux), les granulats (sable, gravier), eau et les superplastifiants. Les BAP se différencient des bétons ordinaires (BO) ou vibrés, par leurs caractéristiques à l'état frais et par leur composition (*Figure I.3*). **(10)**

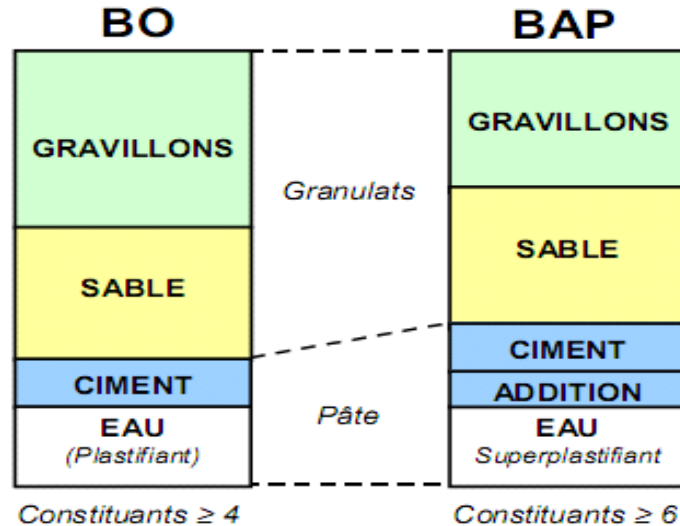


Figure I.3 : Différence entre les BAP et les BO

II.2.1 Le ciment

En principe tous les ciments conformes à la norme SN EN 197-1 conviennent pour la fabrication des bétons autoplaçant à savoir différentes catégories de ciment Portland. Ces ciments conviennent mieux à la fabrication de béton répondant à des exigences plus élevées, telles que haute résistance, délai de décoffrage raccourci ou bétonnage par temps froid.

II.2.2 L'eau

Toute eau du réseau public d'eau potable, convient à la fabrication de BAP. Les eaux recyclées de gâchage et de lavage ne conviennent que sous certaines conditions restrictives, en raison d'éventuels effets indésirables sur les propriétés du béton. Etant donné que le dosage en eau influence de manière considérable sur la viscosité et la capacité de remplissage du BAP, il est indispensable de s'écarter le moins possible de la valeur planifiée. Il est ainsi très important de mesurer et de prendre en compte l'humidité des granulats et tout spécialement du sable. Cas échéant, on tiendra également compte de la teneur en eau des adjuvants.

II.2.3 Les granulats

Le choix d'une granularité continue appropriée est très important, étant donné la forte incidence du volume des vides sur la quantité nécessaire de pâte de ciment (*Figure I.4*). Ainsi, afin d'assurer une bonne stabilité du BAP (éviter toute ségrégation), il est recommandé de choisir un sable spécialement optimisé, au besoin recomposé à partir de plusieurs fractions. Pour empêcher tout risque de blocage du BAP par les barres d'armature lors du coulage, on limite en général le diamètre maximal des granulats à 16 mm. L'expérience a néanmoins montré

qu'il était également possible d'utiliser des granulats de diamètre maximal différent. Les granulats roulés où concassés peuvent en principe être utilisés.

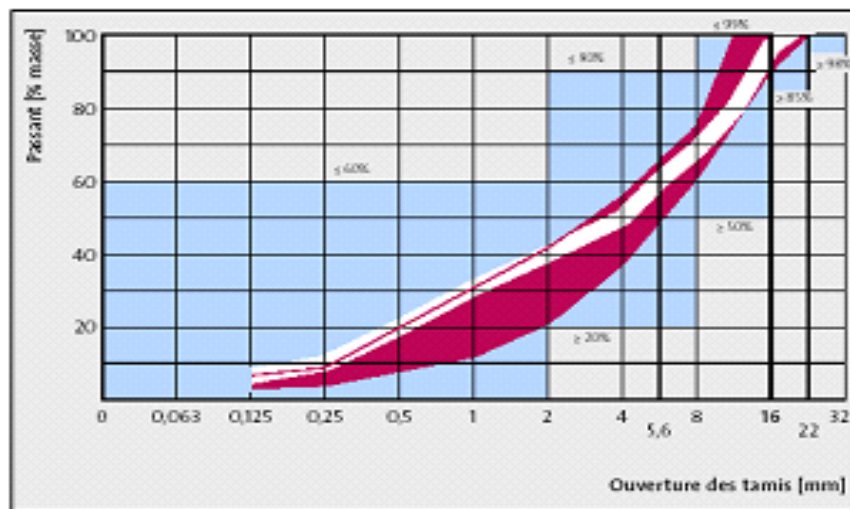


Figure I.4 : Choix de la granularité pour un BAP

II.2.4 Les ajouts minéraux

Les ajouts cimentaires sont des matériaux qui, combinés au ciment Portland, contribuent aux propriétés des coulis frais et durcis par action hydraulique où pouzzolanique où les deux à la fois. Les pouzzolanes naturelles, les cendres volantes, le laitier de haut fourneau granulé broyé et les fumées de silice sont des exemples courants.

Ces ajouts sont incorporés aux mélanges de coulis où de béton pour différentes raisons:

- Améliorer les caractéristiques rhéologiques des coulis (viscosité et stabilité).
- Améliorer la résistance du coulis durci et augmenter sa durabilité.
- Réduire le coût de la matière liante: ces ajouts étant le plus souvent des sous-produits d'autres industries, leur incorporation dans le ciment avec des proportions pouvant atteindre les 30 % permet de réduire le prix de revient de la matière liante.
- Favoriser la pénétrabilité dans les fissures fines: certains de ces ajouts sont plus fins que le ciment (fumée de silice).

Ainsi, l'utilisation croissante d'ajouts cimentaires dans le béton du ciment Portland a entraîné la publication en 1982 d'une nouvelle norme CSA- A23.5, qui fut révisée en 1986. Cette norme reconnaît trois groupes d'ajouts cimentaires : les fumées de silice, les pouzzolanes, les laitiers granulés.

II.2.5 Les Superplastifiants

Afin d'obtenir la très grande fluidité requise d'un béton autoplaçant, on utilise généralement un adjuvant fluidifiant de la dernière génération, à base de polycarboxylates. Permettant ainsi de réduire de manière importante le dosage en eau tout en ayant également un effet sur la viscosité.

L'efficacité d'un adjuvant peut être plus ou moins prononcée selon le ciment et les additions utilisés (compatibilité). De plus, un dosage élevé en ce dernier retarde généralement le début de prise. D'un autre côté, l'utilisation d'un adjuvant stabilisateur permet de réduire le risque de ségrégation du BAP (ressuage, granulats grossiers coulant vers le bas), qui devient ainsi plus stable et moins sensible aux variations du rapport E/C.

Les superplastifiants interagissent avec les particules du ciment et celles des fines en s'adsorbant à leur surface pour diminuer le phénomène de floculation. La grande fluidité des bétons autoplaçants est assurée par des dosages relativement importants en superplastifiants. Ainsi, les particules sont dispersées par combinaison d'effets électrostatiques et stériques et la proportion d'eau libre est plus importante (11).

Il est à noter que la capacité de remplissage d'un BAP croît avec le dosage en fluidifiant jusqu'à un maximum au-delà duquel le phénomène de ségrégation apparaît. Selon Okamura, N (12) rapporté par Trudel, A (13), l'utilisation d'un superplastifiant à faible perte d'étalement est essentielle pour la confection des bétons autoplaçants. Certains fluidifiants comme le FPC (fluidifiant constitué d'un mélange de deux polymères de structure très complexe permettent d'atteindre des étalements de 250 mm sans ségrégation, ce qui n'est pas le cas avec le PC (polymère de type polycarboxylate) et le NC (naphtalène sulfonate) par exemple (14)

II.3 Concept du béton autoplaçant

L'utilisation de bétons très fluides, ne nécessitant pas d'apport d'énergie extérieure pour le serrage, est apparue comme une solution possible à ce problème. C'est ainsi qu'est né le concept des bétons autocompactants ("self-compacting concrete", traduit par béton autoplaçant ou béton autonivellant). Outre leur facilité de mise en œuvre, de tels bétons présentent aussi l'intérêt de réduire le temps de travail sur chantier.

Pour parvenir à ce cahier des charges, les BAP sont formulés différemment des BO. Dans leur cas, la pâte, définie comme le mélange de ciment, de l'eau et d'une addition, est privilégiée au détriment des gravillons. En général, les BAP possèdent un même dosage en ciment et en eau que les BO, ainsi qu'un volume de sable assez proche. C'est donc

principalement l'ajout d'une addition qui sert de substitut aux gravillons. Les proportions exactes de chaque constituant dépendent bien sûr de la méthode de formulation choisie. (15)

II.3.1 Le rôle de la pâte

Le rôle de la pâte est de maintenir et de séparer les gravillons pour limiter les contacts, en particulier dans les milieux ferraillés, et ainsi prévenir la formation de voûtes susceptibles de bloquer l'écoulement. Le volume important d'éléments fins permet aussi de garantir le compromis entre stabilité et maniabilité. Mais il n'est pas suffisant pour atteindre la fluidité. Il est nécessaire d'ajouter aux bétons un défloculant, sans lequel la demande en eau du mélange serait trop élevée.

II.3.2 Le rôle des adjuvants

Les adjuvants ont un double effet, électrique et stérique, qui leur permet de disperser au mieux les particules. La quantité de fines n'est pas non plus toujours suffisante pour empêcher la ségrégation. On a recours alors aux agents de viscosité. Ces adjuvants sont souvent des polymères, composés de longues molécules organiques, qui augmentent la viscosité de l'eau de gâchage. Ils assurent une meilleure stabilité du béton et le rendent moins sensible aux variations de teneur en eau des granulats, courantes en centrale à béton. Cela étant, en pratique leur utilisation est au contraire peu répandue, car ils entraînent un surcoût, qui s'ajoute aux surcoûts dus au superplastifiant et aux additions.

II.4 Classification

La notion de classification des BAP est apparue tardivement et constitue pourtant un paramètre essentiel du développement de ces bétons.

À l'origine, la formulation de BAP, imaginée par le japonais Okamura à la fin des années 1980, est conçue pour réaliser des ouvrages de génie civil, à forte densité d'armatures, pour lesquels des anomalies de mise en œuvre étaient redoutées. Aujourd'hui, et plus particulièrement en Europe, l'utilisation des BAP se développe dans le domaine de la préfabrication et dans celui du béton de bâtiment coulé en place, nécessitant des formulations de BAP différentes : pour le bâtiment elles doivent être moins performantes techniquement (en termes de caractéristiques mécaniques à 28 jours et de qualités d'ouvrabilité) et plus économiques. Par contre, la problématique spécifique de la capacité à donner de beaux parements est à prendre en compte pour les applications verticales.

On distingue donc aujourd'hui, en France (conformément aux Recommandations pour l'emploi des BAP éditées par l'AFGC et le PN BAP), trois catégories :

- **Catégorie1:** il s'agit des ouvrages horizontaux de faible épaisseur (planchers, dallages) pour lesquels le ferrailage est léger et le béton peut être facilement réparti sur toute la surface.
- **Catégorie2 :** elle couvre les ouvrages horizontaux épais pour lesquels les risques de ségrégation statique sont importants, et les ouvrages verticaux courants (on exclut le cas des ouvrages à très forte densité de ferrailage).
- **Catégorie3 :** ce sont les ouvrages exigus ou très fortement ferrailés (pour lesquels l'écoulement du béton dans le coffrage est le plus difficile).

II. 5 Propriétés

Le béton autoplaçant (autocompactant) est un béton qui se compacte de lui-même par effet gravitaire, sans aucun apport d'énergie dont les propriétés sont les suivantes :

- Fluidité élevée, sans aucune tendance à la ségrégation (comme du miel).
- Désaération du béton pendant son écoulement.
- Excellente aptitude au remplissage des moindres recoins du coffrage par un béton homogène, même en présence de réservations, d'incorporés et de ferrailage dense. Le dispendieux et fastidieux travail de vibration est ainsi supprimé.

La réalisation d'un BAP est une opération plus complexe que celle d'un béton ordinaire traditionnel. En effet, il s'agit de combiner un nombre plus élevé de matériaux, opération accompagnée d'éventuels problèmes de compatibilités entre matériaux.

II.5.1 L'ouvrabilité

Le test d'affaissement au cône d'Abrams est très utile pour caractériser les bétons ordinaires, alors qu'il n'est utilisé que pour mesurer l'étalement de la galette d'un BAP et le temps de passage à une galette intermédiaire de 50 cm de diamètre.

Les propriétés générales d'un béton autoplaçant frais sont la fluidité et l'homogénéité. Ces propriétés sont étudiées sur plusieurs aspects, et peuvent se diviser en trois critères mesurables par des tests empiriques : le remplissage, la résistance à la ségrégation, et la capacité à passer à travers les obstacles que nous appellerons capacité de passage **(16) (17)**.

Le béton autoplaçant est capable de remplir les vides et les espaces difficiles dans un milieu confiné, en se déformant sous l'effet de son propre poids, et sans vibrations. Le remplissage est observé sous deux aspects : la capacité de remplissage et la vitesse de remplissage. Le premier aspect est lié à la capacité de déformation du béton. Le second est lié à la vitesse de déformation, il traduit ainsi la vitesse d'écoulement du béton. Le test d'étalement

au cône d'Abrams donne des indications sur les deux aspects **(16)**, puisque le diamètre final atteint par la galette de béton correspond à la capacité de déformation, et le temps de passage à un certain diamètre correspond à la vitesse de la déformation du béton.

La fluidité d'un béton autoplçant est contrôlée par l'état de contrainte existant entre les particules qui le constituent. En effet, pour que le béton s'écoule bien, il est primordial de réduire les frictions et les frottements existants entre les particules solides (gravier, sable, additions, liant) qui génèrent des contraintes empêchant l'écoulement.

Il est donc, nécessaire d'augmenter le volume de pâte (ou diminuer le volume de granulats) pour favoriser l'écoulement du béton **(18)**, **(19)**. L'utilisation de granulats roulés peut aussi être avantageuse lorsqu'on désire réduire les frictions entre les granulats. Il est à noter que la réduction des frictions et frottements entre les particules fines (liant, additions, fines du sable) n'est possible qu'en augmentant le volume d'eau dans le béton. Or une utilisation excessive d'eau diminue considérablement la résistance à la ségrégation, et conduit à des faibles performances mécaniques du béton à l'état durci.

Par conséquent, un bon équilibre est nécessaire entre la résistance à la ségrégation du béton et la fluidité par réduction des frictions entre les granulats. Pour ce faire, il ne suffit pas seulement d'augmenter le volume de la pâte qui doit avoir des propriétés autoplçantes. En effet, la pâte du béton doit présenter une bonne fluidité et conférer au béton une grande résistance à la ségrégation. La fluidité de la pâte peut être assurée par l'ajout d'un superplastifiant qui agit en baissant fortement le seuil de cisaillement de la pâte et celui du béton.

La ségrégation peut se manifester dans un béton de façons différentes, comme la séparation entre la pâte et les granulats, la séparation entre le gravier et le mortier qui peut conduire à un blocage en zones confinées, et une répartition non homogène de l'air occlus. Pour éviter la ségrégation, il faut réduire la quantité d'eau libre dans le béton en réduisant le rapport (E/C).

L'eau libre dans le béton est généralement mobile et peut trouver son chemin vers la surface du béton par effet de gravité et de densité. Ceci se traduit par une couche de laitance en surface libre du béton. Des matériaux de surface granulaire plus élevée, peuvent par absorption et adsorption retenir une quantité supplémentaire d'eau libre. La résistance à la ségrégation du béton peut aussi être augmentée en élevant la viscosité de l'eau dans la suspension, avec certains agents de viscosité.

L'utilisation d'une pâte capable de maintenir les particules solides et l'air distribués uniformément en suspension nécessite une forte interaction entre les phases du béton, qui correspond à des forces résultant des frictions entre les particules. Or, on ne peut pas augmenter les interactions entre les particules du béton puisque l'écoulement du béton sera fortement influencé, et les risques de blocages de gravier seront importants pendant un passage dans un milieu confiné.

Le béton autoplaçant doit posséder également une bonne capacité de passage à travers les armatures et dans les milieux confinés. Ceci nécessite une quantité de gravier inférieure à celle d'un béton ordinaire, et de taille maximale plus petite. Un béton est donc qualifié d'autoplaçant s'il satisfait les propriétés précédentes et le bon compromis entre des caractéristiques presque contradictoires (fluidité, résistance à la ségrégation).

Pour résumer, le tableau ci-dessous résume les propriétés à l'état frais d'un BAP :

Tableau I.3: Propriétés d'ouvrabilité des BAP et les moyens de mise en œuvre

Les propriétés d'un BAP	Moyens d'obtention	Action à mener dans la formulation
Le remplissage (la fluidité)	- Réduction des frictions entre les particules - Optimisation de la pâte	- Augmentation du volume de pâte - Utilisation de superplastifiants - Optimisation du rapport (E/C)
La résistance à la ségrégation	- Réduction de l'eau libre dans le béton - Réduction de la séparation de phases	- Réduction du rapport E/C - Utilisation de matériaux de grande surface granulaire - Utilisation d'agents de viscosité - Réduction du rapport (E/C) - Utilisation d'agents de viscosité
La capacité de passage	- Réduction de blocage des granulats	- Réduction du volume de gravier - Réduction de la taille maximale des granulats

II.5.2 La résistance mécanique

Considéré comme un mélange diphasique à l'état frais (phases solide et liquide), le béton autoplaçant possède une structure plus homogène que le béton ordinaire vibré, grâce notamment à une résistance à la ségrégation élevée. La structure d'un béton autoplaçant est donc supposée être plus compacte et plus homogène que le béton ordinaire vibré.

Les BAP présentent souvent une résistance mécanique plus élevée qu'un béton ordinaire à un rapport (E/C) équivalent (20) (21). L'utilisation des fillers dans la formulation des BAP génère une accélération de sa résistance mécanique aux jeunes âges. Lorsqu'elles sont bien dispersées dans le béton, les particules fines des fillers favorisent l'hydratation du ciment, et conduisent à une matrice cimentaire de structure plus dense. Ces effets ont une influence sensible sur la résistance mécanique jusqu'à 28 jours puis deviennent moins significatifs par la suite.

II.5.3 Le module d'élasticité statique (en compression)

Des bétons autoplaçants et des bétons ordinaires vibrés à résistance mécanique égale sont testés par Assié, S (21).

Pour des rapports gravier sur sable (G/S) similaires, le module d'élasticité des BAP est équivalent à celui des bétons ordinaires. Par ailleurs, pour des rapports (G/S) différents, le module d'élasticité des BAP est inférieur à celui des BO. Ceci est expliqué par le fait que le volume de pâte est plus important pour les bétons autoplaçants.

En effet, le module d'élasticité d'un béton est fonction des proportions volumiques de ses constituants et de leur module respectif (le module de la pâte est bien inférieur à celui des granulats).

II.5.4 Le retrait au jeune âge et à l'état durci

Pour une même classe de résistance, le coefficient de dilatation thermique au jeune âge (0-24 heures) est équivalent pour les bétons autoplaçants et les bétons ordinaires (21). Le retrait au jeune âge en dessiccation des bétons autoplaçants est supérieur à celui des bétons ordinaires (en particulier pour les faibles gammes de résistance).

En dessiccation, les bétons autoplaçants et les bétons ordinaires possèdent en général un retrait total équivalent. Cependant, les deux types de bétons affichent une différence pour les gammes de résistance élevées, où le retrait des BAP est supérieur. En mode endogène, les bétons autoplaçants et les bétons ordinaires présentent un retrait similaire à 28 jours. Au-delà d'un an, les BAP présentent un retrait légèrement supérieur à celui des BO. Il est vraisemblable que les légères différences entre les retraits des deux types de béton est dû au volume de pâte qui est plus important dans les bétons autoplaçants (21).

II.5.5 Les déformations et le fluage

Les bétons autoplaçants subissent des déformations différées sous charge plus importantes que celles des bétons ordinaires dans la même gamme de résistance (21). Les

formations spécifiques propres et totales ainsi que le fluage spécifique, sont légèrement supérieurs dans le cas des bétons autoplaçants, sauf pour la gamme de résistance relative aux bétons de bâtiment pour lesquels ces paramètres sont identiques pour les BAP et BO.

II.5.6 Les propriétés physico-chimiques et durabilité

Dans le domaine physico-chimique, les résultats des essais expérimentaux (perméabilité à l'oxygène, diffusion des ions chlore, absorption d'eau, carbonatation accélérée et lessivage au nitrate d'ammonium) ont été comparés en fonction de la résistance mécanique pour les deux types de béton (autoplaçant et ordinaire). (21)

La perméabilité à l'oxygène des bétons autoplaçants est inférieure à celle des bétons ordinaires vibrés pour une gamme de résistance donnée. Il n'y a pas de différence significative entre les BAP et les BO en termes de diffusion des ions chlore et d'absorption d'eau par capillarité. Et toujours à résistance équivalente, le taux de carbonatation et la cinétique de lessivage au nitrate d'ammonium des deux types de béton restent comparables. Ces propriétés évoluent avec la résistance en compression de manière identique pour les bétons autoplaçants et les bétons ordinaires.

III. BETONS FIBRES ULTRA HAUTES PERFORMANCES

Ces dernières années, des nouveaux bétons ont été développés appelés les bétons fibrés ultra hautes performances connus sous leurs noms BFUHP. Le présent volet vient à apporté des connaissances sur ces types des bétons, leurs particularités de point de vue performances ainsi que leurs méthodes de formulation. Egalement, les effets différés et les applications des BFUHP seront présenté.

III.1 Introduction

La résistance à la compression est généralement considérée comme la principale propriété caractéristique du béton. Depuis la découverte du béton, les études ont été axées sur la recherche de méthodes permettant d'améliorer cette résistance. Des progrès considérables ont été enregistrés dans ce domaine au cours de ces dernières décennies. Aux Etats-Unis, durant les années 1950, une résistance à la compression de 35 MPa était considérée comme une résistance élevée. Dans les années 1970, la limite a été portée à 70 MPa, alors qu'en 1990, la notion de béton à haute résistance était réservée à un béton d'une résistance à la compression comprise entre 60 et 100 MPa (22). Cette évolution n'est pas terminée car une résistance à la compression supérieure à 120 MPa ont été réalisées lors de constructions récentes.

L'augmentation de la résistance à la compression du béton s'accompagne fréquemment de l'amélioration d'autres propriétés, comme la résistance à la traction, la rigidité, la résistance à l'usure, la durabilité, ... etc. Pour certaines applications, ces propriétés peuvent même être plus essentielles que le niveau de résistance atteint. Dans un cas pareil, le choix des composants et de la composition ne doit pas être axé sur l'obtention d'une résistance maximale, mais d'avantage sur l'obtention d'une prestation optimale des propriétés souhaitées. La résistance supérieure obtenue est une incidence de second ordre (23).

Dans ce cadre, l'expression « béton à haute résistance » s'avère insuffisant. Les chercheurs lui préféreront l'appellation « béton à hautes performances », qui est clairement plus générale. Il est parfaitement possible d'obtenir un béton présentant des hautes performances pour une propriété donnée, tout en ne possédant pas une résistance nettement supérieure.

Selon la norme européenne EN 206-1, le béton est considéré comme un « béton à haute résistance » à partir d'une classe de résistance de C55/67. Le premier nombre derrière la lettre C fait référence à la résistance à la compression caractéristique mesurée sur des cylindres de 300 mm de hauteur et d'un diamètre de 150 mm, et le deuxième nombre représente la résistance à la compression caractéristique mesurée sur des cubes de 150 mm de côté (24).

Les premiers matériaux cimentaires fibré à ultra hautes performances sont apparus dans les années 1970 (pâtes de ciment "Compacts" à 640 MPa, de E/C = 0,21 avec cure thermique à 250°C et pressage à 345 MPa (25), puis développés au Danemark dans les années 1980 ("Densified Small Particles" (26) à 270 MPa, avec un E/C de 0,18, suivi du "Compact Cement Composite" en 1987 qui conduisit à la technologie CRC ("Compact Reinforced Concrete").

En France, les premières recherches et les premiers développements ont été effectués par la Direction Scientifique de la Société Bouygues qui développa un Béton de Poudres Réactives (27)

III.2 Définition

Les BFUHP sont des matériaux à matrice cimentaire, de résistance à la compression supérieure à 150 MPa. Ces matériaux sont additionnés de fibres métalliques en vue d'obtenir un comportement ductile en traction. Ils se caractérisent aussi par leur fort dosage en liant et la sélection particulière dont les granulats font l'objet (28).

Du point de vue de leur formulation, ils se caractérisent par (27):

- Un rapport (E/C) très faible $< 0,2$
- L'emploi de sable fin afin d'améliorer l'homogénéité

- Une augmentation de la compacité, par optimisation du squelette granulaire et par pressage du matériau à l'état frais et pendant la prise
- L'emploi de fibres métalliques pour augmenter la ductilité.

En effet, les performances mécaniques des BFUHP encouragent leur utilisation dans divers domaines comme la mécanique et le génie civil : bâtis pour machines-outils, outil d'emboutissage, blocs moteurs, siège d'hélicoptères, poutres et poutrelles, panneaux de façades, conteneur de haute intégrité pour l'entreposage des déchets radioactifs, poutres précontraintes préfabriquées mises en place sur les aéroréfrigérants de centrale nucléaire. De plus, l'absence de gros granulats dans les BFUHP permet de réaliser des éléments de parement très fins d'une épaisseur de 15 mm (29).

III.3 Composition

III.3.1 Le ciment

Comme pour le béton classique, le ciment utilisé pour la confection d'un béton BFUHP est conforme à la norme NF EN 197-1 (30). Le choix du ciment est fait à partir de sa classe de résistance, de ses caractéristiques d'hydratation, de l'agressivité du milieu et, d'une façon plus générale, de la composition du béton et de l'usage auquel on le destine. Pour bénéficier pleinement de l'activité pouzzolanique des fines d'addition, on privilégie souvent les ciments sans ajouts (CEM I).

Les Bétons Fibrés Ultra Performants (BFUHP) possèdent des quantités importantes en ciment et leur masse volumique varie entre 700 et 1500 (kg/m³), beaucoup plus élevée que pour des bétons ordinaires qui ont une masse volumique de 300 à 375 (kg/m³). Les ciments pour les BFUHP doivent avoir une faible teneur en alcalin et C₃A permettant ainsi de réduire les besoins en eau, et la chaleur d'hydratation (31).

Afin de créer suffisamment de pâte dans ce type de béton, il est nécessaire de combiner cette importante quantité de ciment avec la fumée de silice pour enrober les fibres de manière satisfaisante. La pâte liante (ciment + fumée de silice) doit être optimisée pour que le mélange ait un comportement autoplaçant avec un comportement mécanique meilleur.

Durant la fabrication des BFUHP et spécialement au moment où on ajoute de l'eau, seulement 30 % du ciment est hydraté. Les grains n'ayant pas réagi avec l'eau donnent au matériau sa capacité probable d'autocicatrisation. Ainsi, les microfissures seront pontées par les liaisons créées lors de l'hydratation, si l'eau entre en contact avec le ciment non-hydraté.

A cet effet, Granger a étudié sur des éprouvettes en BFUHP préfissurée (avec un rapport $E/C = 0.2$) et une quantité importante en ciment immergées dans l'eau à 20°C pour une période de 10 à 20 jours (32). Les résultats sont comparés avec ceux conservés à l'air. Il a démontré que les éléments ayant été conservés dans l'eau ont des résistances nettement meilleures démontrant ainsi le comportement d'autocicatrisation.

III.3.2 La fumée de silice

Les ultrafines incorporées telles que la fumée de silice agissent dans les BFUHP à trois niveaux :

- Augmentation de la compacité du matériau par l'occupation des vides entre les grains de ciment, les fibres et le sable.
- Amélioration de la rhéologie du mélange.
- Formation de produits d'hydratation par effet pouzzolanique.

Grâce à ces trois actions, le BFUHP peut avoir une structure très compacte avec une meilleure résistance. Plusieurs auteurs ont étudié le dosage nécessaire en fumée de silice donnant les meilleures performances. PARANT propose d'introduire 25 % en fumée de silice et CHAN montre que l'énergie nécessaire pour arracher les fibres de la matrice ainsi que la contrainte d'adhérence atteignent les meilleures performances avec des teneurs entre 20 et 30 % (33), (34).

III.3.3 Le sable

Le sable est choisi pour sa composition minérale (teneur en $SiO_2 > 98\%$), la taille moyenne de ses grains (généralement entre 400 et 600 μm) et leur forme (forme arrondie) (27). Ce doit être un matériau de grande dureté qui permet d'obtenir d'excellentes interfaces pâtes/granulats. La forme des grains arrondie présente une absorption d'eau faible et favorise la rhéologie du béton (35). Il doit avoir aussi une classe granulaire serrée et un module de Young voisin de celui de la pâte, développant ainsi une bonne adhérence (granulat-pâte). En effet on distingue deux catégories de sable :

- Les sables concassés : améliorent les résistances mécaniques par des propriétés d'interface supérieures (adhérence) et limitent ainsi la microfissuration.
- Les sables roulés : augmentent la rhéologie du mélange granulaire. La taille moyenne du sable utilisée dans la fabrication des BFUHP est inférieure à 1mm (33).

Dans la pratique actuelle, il est plus prudent de se borner à l'utilisation de sable dont 12 % de fines sont inférieures à 0,08 mm tels qu'on peut les employer pour des formules de béton classique (36) Ainsi, le sable de plage et le sable de dune, de nature siliceuse et dont la taille des grains est comprise entre 0,063 et 2 mm, semblent parfaitement adaptés à la fabrication des BFUHP.

III.3.4 Les adjuvants

L'adjuvant est un produit incorporé au moment du malaxage du béton à un dosage inférieur ou égal à 5 % en masse du poids de ciment du béton, pour modifier les propriétés du mélange à l'état frais ou à l'état durci, selon la norme NF EN 934-2 (37). Chaque adjuvant est défini par une fonction principale et peut présenter une ou plusieurs fonctions secondaires.

Il existe plusieurs familles d'adjuvants, le tableau ci-dessous illustre les différents adjuvants disponibles alors que nous allons intéresser plus particulièrement aux superplastifiants utilisés dans les BFUHP, à leurs propriétés et à leur mode d'action dans la matrice cimentaire.

Tableau I.4 : Catégories des adjuvants selon la norme (NF EN 934-2) (37)

Adjuvants	Catégorie
Adjuvants modificateurs de la rhéologie du béton	• Plastifiants/Réducteurs d'eau
	• Superplastifiants/Haut réducteurs d'eau
	• Plastifiants/Réducteurs d'eau/Retardateur de prise
	• Superplastifiants/Haut réducteurs d'eau/Retardateur de prise
Adjuvants modificateurs de prise et de durcissement du béton	• Superplastifiants/Haut réducteurs d'eau/Retardateur de prise
	• Superplastifiants/Haut réducteurs d'eau/Retardateur de prise
	• Superplastifiants/Haut réducteurs d'eau/Retardateur de prise
Autres catégories normalisées d'adjuvants	• Accélérateurs de prise
	• Accélérateurs de durcissement
	• Retardateurs de prise
Autres catégories normalisées d'adjuvants	• Hydrofuges de masse
	• Entraîneurs d'air
	• Rétenteurs d'eau

Les grains de ciment au contact de l'eau ont tendance à s'agglomérer (floculation). Ce phénomène, lié à la présence de charges électriques sur la surface des grains, a pour

conséquences de piéger de l'eau qui n'est plus disponible pour l'ouvrabilité et de limiter l'hydratation au cœur des floccs.

Les superplastifiants sont des dispersants qui déflocculent les grains fins en suspension dans l'eau en annulant les forces d'attraction entre les particules de ciment.

Un superplastifiant permet de réduire la quantité d'eau de gâchage et donc d'augmenter la résistance mécanique du béton tout en contrôlant sa rhéologie, mais ses effets ne se développent pas uniquement sur les grains de ciment, mais ils agissent aussi sur les sulfates : c'est leur action sur la solubilité des sulfates qui conditionne les propriétés dispersantes. De plus, à dosages élevés, ils peuvent entraîner des retards de prise importants ainsi que des entraînements d'air (effets secondaires).

La grande majorité des superplastifiants actuellement utilisés dans l'industrie du béton sont des polynaphtalènes sulfonates (PNS) ou des polymélamines sulfonates (PMS) dont le mode d'action est essentiellement la répulsion électrostatique. Plus récemment, deux nouvelles familles de produits ont été mises au point : les polyacrylates (PA) et les polycarboxylates (PC).

Généralement, Les superplastifiants les plus utilisés pour la fabrication des bétons fibrés sont les superplastifiants de la troisième génération tels que le polycarboxylate (PC) de haut réducteur d'eau (38), pour leur fort pouvoir de défloculation. Ils peuvent également réduire les besoins en eau de près de 40 % avec une très bonne fluidité qui peut persister jusqu'à 60 minutes sans qu'il y ait de la ségrégation (39).

Les nouveaux adjuvants présentent deux effets qui peuvent être à l'origine de la dispersion :

- La défloculation par répulsion électrostatique suite à l'adsorption de molécules portant de nombreuses charges de même signe (*Figure 1-5*).
- La lubrification des grains par répulsion stérique due à l'encombrement des molécules (*Figure I.6*).

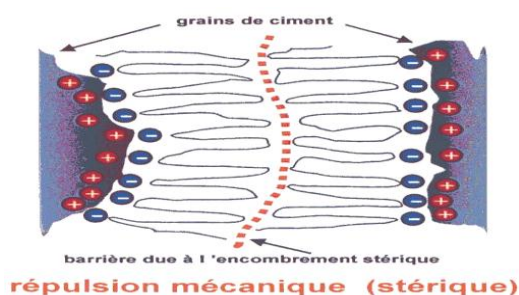


Figure I.5 : Dispersion par répulsion stérique

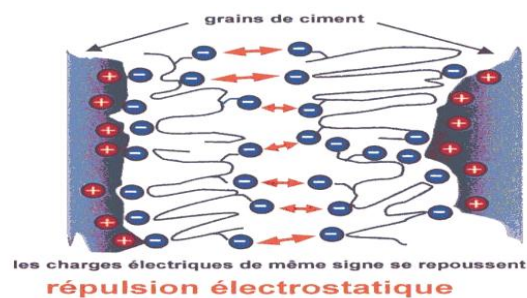


Figure I.6 : Dispersion par répulsion Électrostatique

III.3.5 Les fibres

Actuellement, les fibres les plus couramment employées dans les BFUHP sont les fibres métalliques (notamment en acier) et synthétiques. Elles présentent une très bonne compatibilité avec le béton. Les recherches visant à améliorer l'adhérence au béton ont permis de développer une grande variété de fibres capables, par leur forme ou leur état de surface, de mieux s'ancrer dans le béton.

Les bétons de fibres métalliques ont une bonne résistance à la traction et à la flexion. Ils sont utilisés dans les dallages et les sols industriels (sur sol ou sur pieux), pour la fabrication de voussoirs de tunnels, de coques ou la confection de pieux ou pour réaliser des bétons projetés, pour la réalisation de nombreux produits préfabriqués ainsi que pour la confection de mortier de réparation ou de scellement.

Chaque fibre présente des caractéristiques et des propriétés qui lui sont propres : dimensions (diamètre, longueur, etc.), formes (lisses, crantées, ondulées, biondulées, à crochet, munies de cônes aux extrémités, etc.), résistances mécaniques (résistance à la traction).

Tableau I.5 : Caractéristiques de fibres utilisées dans les BFUHP (40)

Propriétés	Acier doux	Acier HR	Carbone	Kevlar
Masse volumique (kg/m ³)	7850	7850	1780	1500
Résistance à la traction (MPa)	600	1200-3000	3600	2900
Module élastique (GPa)	200	200	228	130
Allongement à la rupture (%)	< 3,0	< 3,0	< 1,0	2,5
Fabrication	Laine d'acier	Tréfilées	Mono filament	Mono filament
Coût (€/kg)	1,83	3,66	11,90	-

Pour faciliter leur utilisation, les fibres doivent être faciles à incorporer dans le béton et ne pas perturber le malaxage, elles doivent aussi se répartir de manière homogène lors du malaxage au sein du béton (pas d'agglomération de fibres) et lors du bétonnage alors que pour améliorer les performances mécaniques des bétons (ductilité, résistance en flexion, résistance aux chocs, etc.), les fibres doivent être déformables sans être fragiles et relativement longues et fines et présenter une grande surface spécifique, et possèdent un module d'élasticité plus élevée que celui de la matrice cimentaire pour assurer une bonne adhérence avec la pâte de ciment.

Pour les bétons de fibres conventionnels, l'éclatement des fibres a une influence significative sur la maniabilité du mélange. Pour un dosage en fibre maintenu constant, la maniabilité va décroître avec l'augmentation de l'éclatement de celles-ci. De plus le mélange aura tendance à contenir des enchevêtrements de fibres, ce qui n'est pas du tout optimal pour obtenir un matériau homogène. Le même phénomène est d'ailleurs observé si le dosage en fibres est graduellement augmenté tout en conservant le même éclatement des fibres.

Les dosages en fibre employés dans les BFUHP sont relativement importants. Ils peuvent varier entre 2 et 11%, (33), (41) (42). Avec des dosages en fibres aussi élevés, il devient donc nécessaire d'utiliser des fibres relativement courtes (<30 mm) afin de diminuer la perturbation qu'elles introduisent dans l'arrangement granulaire de la matrice. L'enrichissement du matériau en fibres se fait donc en substituant le granulats (sable). En effet, ROSSI a montré que pour augmenter le dosage en fibres tout en conservant une maniabilité du mélange adéquate, le sable doit être remplacé par les fibres en acier (43).

L'apport des fibres est de conférer au matériau un comportement écrouissant en pontant les fissures. Il faut d'ailleurs préciser que la plupart des auteurs utilisent des mélanges de fibres avec comme but d'améliorer la capacité de déformation en agissant par effet d'armature à plusieurs niveaux. Parant a employé des mélanges contenant jusqu'à trois types de fibres différentes (33).

III.4 Principes de formulation des BFUHP

Formuler un béton consiste à déterminer les proportions des différents constituants permettant de satisfaire des propriétés rhéologiques et mécaniques exigées par l'utilisation du matériau. Dans le cas d'un BFUHP, l'optimisation du squelette granulaire constitue la phase primordiale de la formulation. Elle a pour objectif de combler la porosité de cet empilement avec la pâte afin d'obtenir l'ouvrabilité désirée, cette pâte étant elle-même déterminée par le rapport (E/C) pour viser une résistance et une durabilité données.

Les principes de base sur la formulation des BFUHP ont été étudiés par plusieurs auteurs (44), (45) ; Ces principes sont :

- La composition des BFUHP repose au minimum sur cinq constituants : le ciment, la fumée de silice, les fibres, l'eau et le superplastifiant. Le rapport (E/C) varie entre 0,15 et 0,2 avec des dosages en fumée de silice variant entre 20 % et 30 %.

- Réduction de la taille des gros grains afin de diminuer l'effet mécanique lié à l'hétérogénéité du matériau (taille maximale de moins de 7 mm selon les recommandations japonaises et inférieure à 2,5 mm pour les recommandations de l'AFGC).
- Augmentation de la quantité de la pâte cimentaire, à savoir le ciment et les additions pouzzolaniques telles que la fumée de silice (47).
- Augmentation de la ductilité du matériau, de la capacité de déformation et la résistance à la fissuration avec l'ajout des fibres courtes et longues.
- L'optimisation du dosage en superplastifiant des BFUHP dépend généralement de la maniabilité souhaitée et de la facilité de mise en place dans les moules (coulabilité). Le dosage en superplastifiant est compris entre 1,8 et 3% en extrait sec par rapport au ciment.

L'obtention de résistances élevées et de faibles perméabilités aux agents agressifs passe par une réduction très importante de la porosité et plus précisément du réseau des pores connectés, en jouant sur deux paramètres :

- Une teneur en eau extrêmement faible (rapport eau/ciment $< 0,25$ voire 0,20) grâce à l'utilisation optimisée de superplastifiants qui déflocculent les particules fines.
- Une compacité maximale, obtenue en utilisant des composants correspondant à plusieurs classes granulaires (classiquement quatre, qui incluent ciment, ultrafines, fillers et sable). La taille et la quantité des plus gros grains sont considérablement réduites (diamètre maximal variant de 1 à 7 mm).

L'optimisation de l'empilement granulaire permet de diminuer le volume des vides. Les BFUHP présentent donc une très faible porosité capillaire. L'emploi d'adjuvants tels que les plastifiants réducteurs d'eau et les superplastifiants fluidifiants permet de formuler les BFUHP avec un très faible rapport Eau/Liant équivalent.

Les fibres, composant clé des BFUHP confèrent au matériau sa ductilité. Ces fibres ont une longueur adaptée à la taille du plus gros grain et une section la plus faible possible pour garantir un bon ancrage. Elles ont en général un diamètre de 0,1 à 0,3 mm et une longueur de 10 à 20 mm. Les fibres métalliques sont utilisées pour des applications structurelles nécessitant des résistances mécaniques importantes, les fibres polymères et minérales plutôt pour des applications esthétiques.

III.5 Les propriétés des BFUHP

III.5.1 Le comportement rhéologique

Il est généralement admis que le comportement du béton frais est bien représenté par le modèle Binghamien après qu'un cisaillement ait été imposé pendant un certain temps. Le béton peut donc être caractérisé entièrement par deux paramètres soit la viscosité plastique et le seuil de cisaillement selon Bonneau (48).

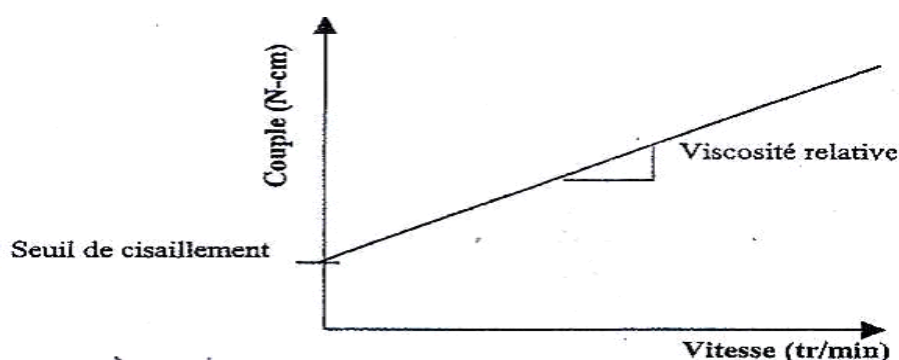


Figure I.7 : Représentation du comportement rhéologique des BFUHP (48)

Bonneau a montré que les BFUHP, qui sont visqueux et très collants, sont des matériaux thixotropes, dont la viscosité apparente est fonction décroissante de la vitesse de déformation, et que les propriétés rhéologiques diminuent dans le temps dès la fin du malaxage.

La composition du mélange, le temps de malaxage, le dosage optimal en superplastifiant et la température affectent le comportement rhéologique des BFUHP. Il a aussi montré que les constituants utilisés adsorbaient une quantité croissante de superplastifiant selon l'ordre suivant : fumée de silice, quartz broyé, ciment. L'adsorption dépend fortement de la surface spécifique.

La séquence de malaxage pour un BFUHP mélangé dans un malaxeur classique à faible cisaillement est présentée dans le (Tableau1-6). Le temps de malaxage peut varier selon le rapport (E/C, le dosage en ciment et en ultrafines et l'efficacité du super plastifiant utilisé.

Tableau I.6 : Malaxage de BFUHP fabriqué en laboratoire (48)

Temps de malaxage	Le déroulement d'essai
2 min	Homogénéisation des matériaux secs.
3 min	Ajout de l'eau et de la moitié du superplastifiant
5 min	Ajout de l'autre moitié du superplastifiant - Malaxage à grande vitesse.

III.5.2 Le comportement mécanique des BFUHP

III.5.2.1 Le comportement à la flexion

Dans le cas des BUHP non fibrés, la résistance aux efforts de flexion ne dépasse pas les 20 MPa et présente une rupture fragile. De ce fait, leur comportement mécanique est linéaire élastique jusqu'à la rupture. L'addition de fibres entraîne une augmentation significative des résistances et une augmentation de la ductilité. Le comportement post-pic de rupture est fortement amélioré, pour les BFUHP sans pressage avec une résistance à la flexion de l'ordre de 60 MPa.

III.5.2.2 Le comportement à la traction

Le comportement mécanique des BFUHP en traction directe se compose de trois domaines distincts (élastique, adoucissant et écrouissant), il est fortement lié à l'évolution de la fissuration au niveau de ces 3 domaines. Ainsi, selon plusieurs auteurs, il est possible de définir quatre types de fissurations(41), (49), (50) :

- Microfissures préexistantes : ces fissures peuvent être présentes dans la matrice avant le chargement. La pâte cimentaire est en partie la cause de ces fissures dues au retrait endogène de la matrice cimentaire. Ces dernières n'influencent pas la rigidité du matériau de manière significative.
- Macrofissures distribuées : Ces fissures représentent le domaine écrouissant, dont les microfissures qui se transforment en microfissures à la fin du domaine élastique. Ces fissures sont visibles à l'œil nu ($> 0,1$ mm) et la rigidité de l'élément diminue de façon remarquable.
- Macrofissures localisées : Le domaine d'influence de cette étape est le domaine adoucissant. Les déplacements se concentrent dans une ou plusieurs macrofissures. Le déplacement final de l'élément se localise dans une seule fissure dominante. C'est d'ailleurs cette macrofissure dominante qui conduira à la rupture de l'élément.
- Fissure réelle : A la fin du domaine adoucissant, la fissure est alors définie comme une fissure réelle, lorsque plus aucune charge ne peut être prise par les fibres à travers la fissure dominante.

Selon leur dosage et leur élanement les fibres peuvent intervenir à différents niveaux de fissuration. A l'échelle du matériau où il faut qu'elles soient nombreuses et de petites tailles pour agir dans la zone pré-pic en retardant l'apparition des microfissures. A l'échelle de la structure elles agissent sur la phase de microfissuration et de macrofissuration pour augmenter la ductilité du matériau. Leur longueur doit être suffisamment élevée, en effet, plus la fibre est

longue plus elle résistera aux ouvertures de fissures importantes. Ce raisonnement montre l'importance d'employer des fibres de différentes longueurs permettant de ponter les fissures à différents niveaux comme le préconise ROSSI (43).

III.5.2.3 Le comportement en compression et module d'élasticité des BFUHP

La définition des BFUHP suppose que la résistance en compression est très élevée. Ainsi un BFUHP sans fibres métalliques explose littéralement lors de la rupture en compression simple. Un tel phénomène a été photographié par Graybeal. On peut noter la fin très nette de résistance sur la courbe contrainte/déformation lors d'un essai de compression simple (*Figure I.8 (a)*).

L'ajout des fibres métalliques permet alors de modifier très largement le comportement du matériau sollicité en compression simple. Elles permettent de supprimer le caractère fragile du béton. La ductilité alors acquise est visible sur la (*Figure I.8(b)*). (51)

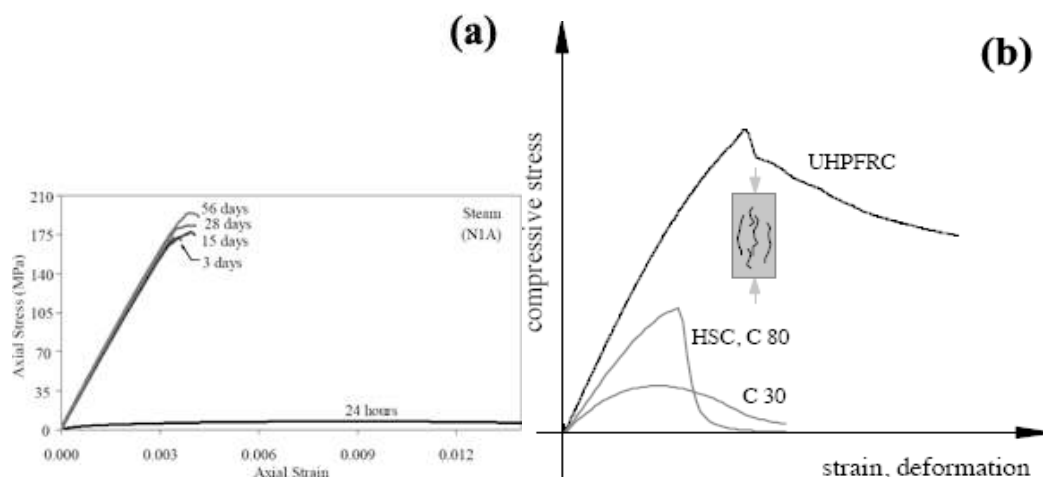


Figure I.8 : Courbes typiques de la résistance en compression : **(a)** d'un béton ultra hautes performances sans fibres métalliques d'après Graybeal, (52) et **(b)** d'un béton fibré ultra hautes performances d'après Spasojevic. (53)

En ce qui concerne l'évolution du module d'élasticité avec la température, la (*Figure I.9*) montre celles du BFUHP BSI (sans précharge) et du Ductile (avec précharge à 20 % de la capacité portante de l'éprouvette). Si on avait une augmentation ou une stagnation de la résistance.

Pour la compression et la traction entre 25°C et 300°C, ce n'est pas le cas pour le module d'élasticité. Plus exactement, seul l'essai effectué après refroidissement et avec un chargement

à 20 % de la capacité fournit une stabilisation de la raideur du matériau entre 250°C et 600°C. La figure résume le fait que la diminution du module d'élasticité est la plus rapide pour un essai à chaud sans précharge. Puis la précharge densifie le matériau, ce qui permet d'avoir une diminution plus lente avec la température. Enfin, l'essai résiduel avec précharge permet d'obtenir une stabilisation du module jusqu'à 600°C. (51)

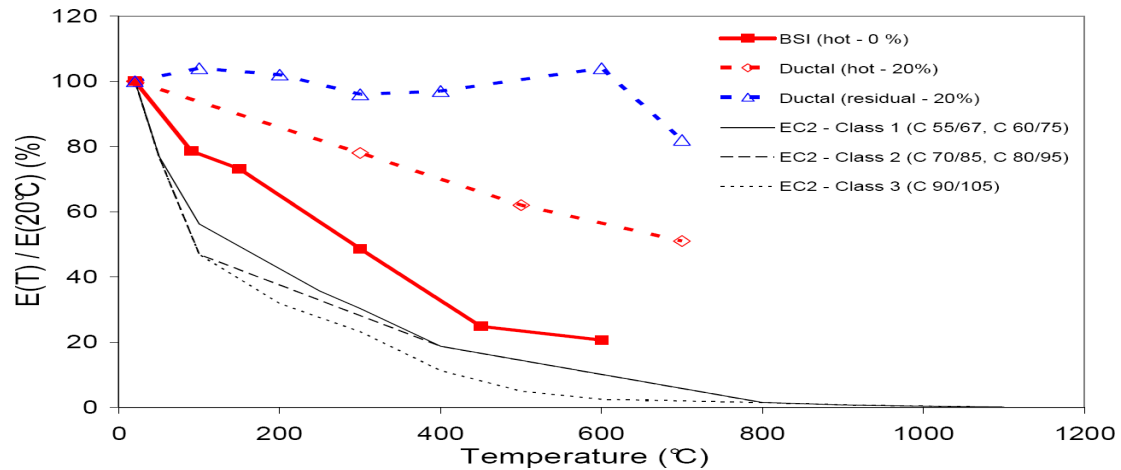


Figure I.9 : Evolution en fonction de la température de module d'élasticité du Ductal et du BSI d'après Pimienta.(54)

Différentes études publiées montrent que l'ajout des fibres n'apporte pas d'amélioration appréciable en compression. La résistance à la compression est généralement du même ordre de grandeur que celle d'une matrice cimentaire non renforcée. Cependant, si la fabrication du composite est inadéquate, on pourra observer une réduction de la résistance à la compression (55).

L'accroissement de la déformabilité à la rupture que procurent les fibres peut être une propriété intéressante en pratique ; mais l'absence d'effet des fibres sur la résistance en compression peut être justifiée par le fait que la matrice possède naturellement de très bonnes propriétés en compression. La diminution de la résistance après le stade ultime est largement due à la désolidarisation agrégat-pâte, alors que les fibres ne contribuent à la résistance qu'après la rupture de la matrice, ce que veut dire qu'elles ont un faible effet sur la résistance de béton à la compression.

III.5.3 Le comportement des fibres dans les BFUHP

L'incorporation des fibres dans le béton a pour objectif d'éviter une rupture fragile dans le matériau cimentaire sous un chargement ultime. Les fibres discontinues dans le béton jouent le même rôle que les barres en acier dans le béton armé, c'est-à-dire, transmettre des contraintes

de traction de la matrice vers la fibre pour empêcher une rupture fragile. Ce mécanisme est généralement appelé « l'effet du pontage des fissures ».

Durant le pontage des fissures par des fibres, deux mécanismes de rupture s'établissent : Le décollement de l'interface fibre-matrice et l'arrachement de la fibre. La fibre reprend l'ensemble des forces de traction agissant sur la fissure et le transfère aux fibres présentes dans la matrice. Dans ce cas, la capacité totale à la traction du composite fibré dépend de la contrainte d'arrachement de la fibre assurant le pontage de la fissure. Si la résistance à l'arrachement est élevée, la réponse à la traction sera meilleure.

Dans la réalité le pontage des fissures se fait par un groupe de fibres orientées de façon aléatoire par rapport à la contrainte principale. L'essai d'arrachement d'une fibre est le moyen le plus efficace pour simuler le pontage des fissures par des fibres. Les fibres sont dites pleinement efficaces lorsque leur rendement en traction est utilisé jusqu'à 80 à 90 % de la capacité totale en traction.

Plusieurs auteurs ont travaillé au développement et à l'étude des techniques de mesure du comportement à l'arrachement d'une fibre (56). L'essai « Pull out » permet d'avoir une bonne connaissance de l'adhérence interfaciale fibre-matrice si la fibre travaille par cisaillement seulement ou par cisaillement et ancrage à la fois (fibres avec des crochets, fibres torsadées, ou des fibres traitées rendues rugueuses).

L'adhérence interfaciale représente le lien mutuel entre chaque fibre et la matrice qui l'entoure. Lorsque la fibre est soumise à un effort d'arrachement, le décollement de la fibre ne se produit pas à la surface de la fibre mais au niveau de l'interface (57).

L'hydratation parfaite du ciment est complexe à réaliser, et dans le cas d'une matrice cimentaire ultra-hautes performance l'hydratation est toujours incomplète, donc de l'eau peut être piégée autour de la fibre. Ce phénomène se traduit, d'une part, par une porosité supérieure autour des fibres que dans la matrice cimentaire, et d'autre, part par une grande quantité d'hydroxyde de calcium Ca(OH)_2 .

La micro dureté autour de la fibre dans le cas de béton ordinaire est généralement de 30 à 50 % inférieure que les bétons de faible rapport (E/C), ce qui implique aussi une plus grande porosité dans la zone interfaciale. Plus le rapport eau/liant (E/L) est petit, plus la dureté de la zone d'interfaciale est élevée.

Plusieurs auteurs proposent un traitement chimique par « silanisation » pour améliorer l'adhérence interfaciale entre la fibre de verre et la matrice cimentaire. Ce traitement est réalisé

suivant trois étapes, l'hydrolyse, la silanisation et le séchage. Certains auteurs comme Xu ont essayé de modifier la morphologie de la surface de fibres de carbone par un agent de couplage. Ce traitement a abouti à une augmentation de 54 % en traction et 36 % sur son module d'élasticité (58).

Les bétons fibrés sont des matériaux complexes car leur comportement mécanique en traction est fortement influencé par l'orientation des fibres. Dans le cas des mélanges autoplaçants, l'orientation des fibres devrait être théoriquement bidimensionnelle. La fabrication des bétons de fibres conventionnels ou des BFUHP nécessite un malaxeur de haute énergie qui permet de mieux disperser les fibres. Ce malaxeur agit aussi sur la défloculation des ultrafines et sur la dispersion de l'eau et du superplastifiant(59). Les principales techniques utilisées pour déterminer la distribution et l'orientation des fibres sont : les méthodes destructives (le comptage manuel ou automatique) et les méthodes non destructives (Rayon X).

III.6 Effets différés du BFUHP

III.6.1 Le retrait

La composante principale du retrait du BFUHP provient du retrait endogène, au cours duquel l'eau est consommée par l'hydratation du ciment. Pour des éléments préfabriqués, l'effet du retrait est moins importante que pour les éléments coulés en place, car une grande partie se produit avant que les éléments ne soient assemblés sur le chantier, et n'a donc aucune influence sur le comportement de la structure dans son ensemble (60).

III.6.2 Le fluage

Le fluage est une augmentation graduelle de la déformation sous contraintes constantes. Il a pour conséquence une réduction de l'effort de précontrainte par suite du raccourcissement de l'élément. Les valeurs observées du fluage pour les éléments en BFUHP sont très basses, avec un coefficient final de fluage ϕ de l'ordre de 0,6. Pour les éléments qui ont subi un traitement thermique, cette valeur s'abaisse à approximativement 0,2.

Les propriétés spécifiques en termes de retrait (quasiment nul) et fluage (très faible) permettent de maîtriser toutes les difficultés de conception liées aux déformations différées. Elles sont particulièrement intéressantes pour la réalisation d'ouvrages précontraints par post-tension ou pré-tension car les pertes de précontrainte sont ainsi fortement réduites. (60)

III.6.3 Absorption d'eau

Le BFUHP est considéré comme un matériau possédant une porosité capillaire très faible et un matériau cimentaire très durable (27). Plusieurs recherches ont été menées sur

l'absorption d'eau des BFUHP afin d'évaluer la pénétration des agents agressifs au sein du matériau. Roux et al (61) ont réussi à mesurer une absorption d'eau des BFUHP inférieure à 0,2 kg/m² après 15 jours, à comparer aux 2,75 kg/m² pour le béton ordinaire.

III.6.4 L'autocicatrisation des fissures

Grâce à un rapport (E/C très faible (0.25) et à un fort dosage en ciments (≈ 700 kg/m³) le BFUHP conserve une grande quantité de clinker résiduel. Les grains de clinker disponibles peuvent s'hydrater en atmosphère humide, pour former des hydrates qui cicatrisent les microfissures (62).

La teneur résiduelle en clinker (%) est comme suit :

- BFUHP 50 à 60
- BHP (non fibrés)..... 5 à 10
- Béton B25..... 0

III.6.5 Le traitement thermique

Les BFUHP peuvent faire l'objet de traitements thermiques juste après la fin de leur prise, ce qui permet:

- d'obtenir des résistances mécaniques élevées très rapidement.
- d'obtenir des performances en traction et en compression plus élevées.
- d'améliorer la microstructure.
- d'améliorer la durabilité grâce à une réduction de la porosité.
- de diminuer les effets différés du retrait et du fluage.
- d'éviter tout risque de fissuration par retrait.

Après traitement thermique, le retrait est quasi inexistant et le fluage très fortement réduit. (60)

III.6.6 La microstructure et durabilité des BFUHP

Du fait de leur microstructure extrêmement dense, de leur porosité capillaire très faible et de leur compacité, les BFUHP présentent des caractéristiques de durabilité exceptionnelles (résistance aux cycles gel-dégel, résistance aux sels de déverglaçage, à l'eau de mer, aux sulfates, résistance à la carbonatation, résistance à la pénétration d'ions agressifs et des acides faibles, résistance à l'abrasion, aux chocs, excellente tenue aux températures élevées ainsi qu'aux ultraviolets). Donc, sa matrice cimentaire constitue un milieu quasi imperméable à l'air et à la pénétration des divers agents agressifs. (63).

Les BFUHP sont des matériaux à structure micrométrique. Ses composants varient du millimètre au nanomètre. Le dosage en eau est inférieur à celui nécessaire pour l'hydratation complète du ciment. Ils possèdent ainsi une réserve de ciment anhydre qui leur procure un potentiel d'auto cicatrisation en cas de fissuration.

La figure ci-dessous représente la différence de section polie un béton fibré (BFUHP) et un béton ordinaire (BO).

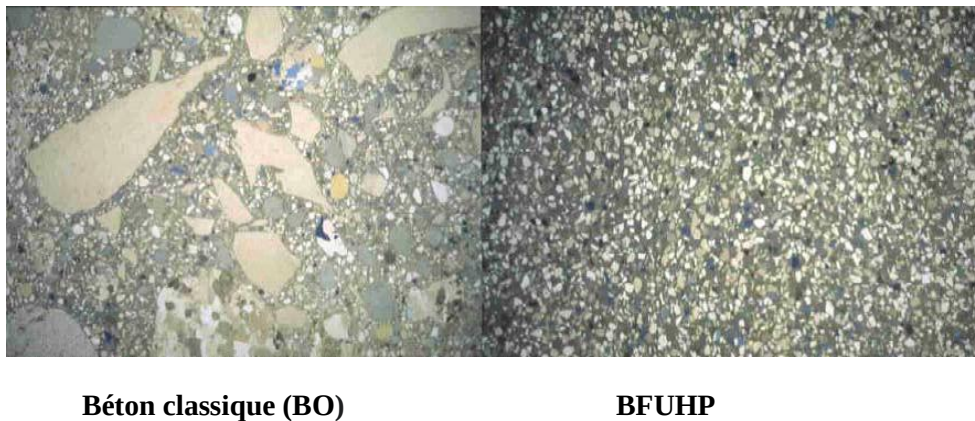


Figure I.10 : Différence de section polie de BFUHP et Béton classique **(60)**

III.6.7 Les applications des BFUHP

Le BFUHP présente des avantages et des performances très intéressantes par rapport au béton traditionnel:

- Durabilité améliorée face aux agressions physico-chimiques (perméabilité réduite, meilleure protection de l'armature contre la corrosion, réduction de la pénétration des ions chlore, diminution des risque de l'alcali-réaction, meilleure résistance au gel,...etc.).
- En règle générale, une fluidité très élevée à l'état frais. Cette caractéristique facilite la mise en œuvre du béton, même dans les zones à densité d'armature élevée.
- Résistance accrue au jeune âge. Cette propriété permet de réduire le temps de coffrage et d'accélérer la mise en précontrainte.
- Une résistance finale accrue après durcissement, ce qui permet de réduire les sections du béton et par conséquent, la diminution du poids de la construction.
- Un module d'élasticité supérieur, susceptible d'améliorer la stabilité aérodynamique de ponts élancés.
- Un retrait total réduit, qui s'avère avantageux pour la maîtrise des déformations d'une construction, ainsi qu'en ce qui concerne les pertes de précontrainte.

Dans l'industrie de préfabrication, l'utilisation du BFUHP offre de nouvelles perspectives. Citons notamment la possibilité de produire des cellules préfabriquées complètes, grâce à la réduction du poids d'éléments réalisées. Un autre avantage du BFUHP par rapport au béton ordinaire est l'aspect visuel des surfaces de béton, tant coulées sur place que préfabriquées. L'apparition de petites bulles d'air à la surface est souvent très limitée. La surface présente généralement une bonne texture, grâce à la haute teneur en fines. En outre, le BFUHP n'est guère soumis à la ségrégation, de sorte que la formation de nids de gravier est généralement évitée. La présence de fumées de silice permet d'obtenir parfois des teintes plus sombres.

CONCLUSION

Dans cette revue bibliographique, notre objectif était de définir les bétons spéciaux (BAP, BFUHP), ses constituants, ses multiples propriétés, les méthodes principales de formulation et enfin sa caractérisation à l'état frais et durci.

Le BAP est un béton très fluide, homogène, et qui se met en place sans vibration. Il présente des avantages techniques et socio-économiques pour les chantiers de construction par rapport au béton ordinaire traditionnel. Le béton autoplaçant à l'état frais peut être caractérisé à deux niveaux : ouvrabilité et rhéologie.

Les principales propriétés d'ouvrabilité d'un BAP sont le remplissage, la résistance à la ségrégation et la capacité de passage dans les milieux confinés. Un béton est qualifié d'autoplaçant lorsque ces trois critères sont vérifiés. Ainsi, un grand nombre de tests empiriques sont développés pour caractériser les BAP vis-à-vis des propriétés d'ouvrabilité. Par ailleurs, les propriétés rhéologiques d'un béton autoplaçant sont principalement reliées au seuil de cisaillement et à la viscosité. Un BAP est caractérisé par un faible seuil de cisaillement pour permettre l'écoulement sous l'effet de gravité, et par une viscosité suffisante pour améliorer la résistance à la ségrégation et l'homogénéité.

Les BFUHP sont des matériaux très résistants en compression et à l'usure, et pourraient remplacer certains métaux comme l'acier et l'aluminium (ils ont un module d'élasticité comparable à celui de l'aluminium) tout en étant moins chers, malgré le coût élevé des constituants. L'utilisation des BFUHP pourrait aussi permettre de diminuer le poids des pièces réalisées à ce jour en béton traditionnel en diminuant les sections et/ou en augmentant l'élancement des pièces.

La fluidité de ce matériau lui confère une utilisation appropriée pour produire des formes de complexité variée. Ce produit va, dans l'avenir, être de plus en plus courant, vu sa maniabilité au niveau des formes et ses caractéristiques en matière de durabilité. Il va également en faire un produit incontournable des techniques d'application de demain.

Chapitre 2 : Les déchets minéraux utilisés dans les bétons

Notre étude est consacrée à la valorisation des déchets de nature minérale dans la formulation des nouveaux bétons (bétons autoplacants, et bétons fibrés ultra hautes performances). De ce fait, il est nécessaire de présenter des connaissances de base sur les différents déchets utilisés dans notre travail (déchets de mousse de verre, déchets de briques réfractaires, le sable de dune, la fumée de silice, et les coquilles de mer). Dans ce chapitre les connaissances suivantes seront abordées : définitions et composition chimique des déchets étudiés, leurs caractéristiques physiques, chimiques et minéralogiques, et leurs différentes utilisations dans la formulation des mortiers et bétons soit comme agrégats fins ou agrégats grossiers.

I. LES DECHETS DE VERRE

I.1 Introduction

Le mot verre a connu plusieurs sens aux fils du temps, un état de substance, un matériau fonctionnel ou un objet. En 1945 (American society for testing materials ASTM) a proposé la définition la plus répandue dans le milieu scientifique : « Le verre est un produit minéral obtenu par fusion qui se solidifie sans cristalliser ».

C'est un matériau amorphe, du point de vue de la diffraction des rayons x, caractérisé par une transition vitreuse. Cette dernière est définie comme étant un phénomène au cours duquel un solide amorphe présente avec la variation de la température un certain changement (plus ou moins amorphe) des dérivées de ces propriétés thermodynamiques au point de transformation solide-liquide. Cette définition est la plus appropriée car elle n'impose aucune restriction quant à la manière dont est obtenu le matériau vitreux.

Pour fabriquer les verres, on utilise des matières premières constituées en grande partie par des roches naturelles et en plus faibles quantités par des produits chimiques industriels. La quasi-totalité des verres fabriqués industriellement sont constitués principalement par des mélanges d'oxydes avec des quantités limitées de sels (chlorures, fluorures).

Ainsi, l'aptitude à la vitrification dépend de la nature et de la proportion des oxydes formateurs et des oxydes modificateurs. Tel que l'oxyde formateur est celui qui peut former le verre tout seul ou en combinaison avec un autre oxyde, cependant, l'oxyde modificateur, inapte par lui-même à devenir un verre, modifie avantageusement par sa présence les conditions de vitrification et les propriétés physiques et chimiques du verre obtenu (64)

I.2 Structure et composition chimique du verre

Les constituants de base des verres industriels de grande production sont limités à ceux qui peuvent être apportés par les matières premières les moins chères :

- Le sable (riche en SiO_2), après avoir subi un traitement afin de diminuer sa teneur en FeO_2
- Le calcaire, la dolomie et des roches alumineuses après avoir subi un broyage.
- Le charbon broyé (charbon du bois) lorsque le verre contient des quantités importantes des sulfates.
- Quelques constituants secondaires, dont la proportion n'excède généralement pas 1% sont souvent introduits pour modifier la teinte ou les conditions de l'élaboration du verre (Na_2CO_3 , Na_2SO_4 , MnO_2 , Se ,...etc).

La structure de verre n'a été élucidée de façon satisfaisante que depuis une trentaine d'années. Des travaux exécutés à l'aide des rayons x ont montré que l'ordre moléculaire dans les verres est, d'une façon général irrégulier, analogue à celui d'un liquide. On avait supposé que le verre, dans sa structure, n'était qu'un liquide figé.

Les travaux de W.L BRAGG ont démontré l'existence de tétraèdre de SiO_4 constituant l'élément constitutif universel des silicates. Lorsque le verre est constitué par plusieurs composants comme par exemple un verre sodalcalique et nombreux autres verres techniques, il s'y forme également un réseau de tétraèdres SiO_4 , avec des lacunes où des cations Na^+ et Ca^{2+} s'insèrent. Ces cations sont des modificateurs qui créent des points de séparation entraînant ainsi un changement des propriétés du verre. Plus leur nombre est grand, plus faible est la viscosité du verre. Ce qui explique que la baisse de la viscosité du verre de silice après addition de soude(65).

Certains éléments comme le silicium et le bore peuvent former un verre par leur seule combinaison avec de l'oxygène (oxyde de..) et à une très haute température. Ces oxydes sont appelés oxydes formateurs car ils forment le squelette du verre. On les combine avec d'autres éléments dites (modificateurs) qui sont :

- Les fondants qui abaissent la température de fusion des oxydes formateurs ($\text{SiO}_2 = 1730^\circ\text{C}$)
- Les stabilisants qui modifient les propriétés physiques du verre atténuées par l'adjonction du fondant.

I.3 Propriétés du verre

I.3.1 Propriétés physiques

I.3.1.1 La densité : La densité du verre dépend de sa composition et jusqu'à un certain degré de son passé thermique. Le verre à l'état solide ne possède qu'une faible dilatation thermique et lorsqu'il commence à se ramollir (dans la zone de transformation) sa densité diminue très rapidement.

Tableau II.1 : Valeurs de densité des différents types de verre

Type de verre	Densité (g/cm^3)
Verre de quartz	2.21
Glasses	2.49
Verre armé	2.59
Verre creux et verre pressé	2.46
Verre au plomb (demi lourd)	3.00
Verre pour appareils optiques	2.34

I.3.1.2 La porosité et l'absorption de l'eau : Les valeurs de ces caractéristiques physiques, déterminées suivant la procédure européenne normalisée NF EN 1097-6 sont indiquées dans le (*Tableau II.2.*)

Tableau II.2 : Propriétés physique du verre

Le granulat	La masse volumique (g/cm ³)	L'absorption d'eau (%)	La porosité(%)
Le verre	2,31	1,34	0,03

I.3.1.3 La surface spécifique : La mesure de la surface spécifique est importante parce que de nombreux processus physiques et chimiques se déroulent à la surface des solides. Elle pourrait être un indicateur de réaction alcali-silice ou pouzzolanique selon qu'elle est petite ou très grande. Elle est petite lorsque la taille des granulats est grande (favorisant la réaction alcali-silice) et grande lorsque la taille des granulats est très petite (favorisant la réaction pouzzolanique).

I.3.1.4 La morphologie des grains : Le temps de broyage modifie la morphologie des granulats de verre. En effet, plus les particules sont broyées plus elles perdent leur forme allongée et deviennent arrondies, à faciès sans arêtes (**66**).

I.3.2 Propriétés mécaniques

Le verre est un corps fragile qui n'admet pas de changement de formes notables, provoquées par la pression, les chocs ou les coups. La grande dispersion des valeurs dépendent de la résistance des verres. On suppose que dans la structure du verre, il y a des failles de réseau qui agissent comme des entailles et diminuent fortement la résistance locale. Des rayures et des fissures à peine visibles diminuent fortement la résistance. La durée et la vitesse de l'effort exercé sur le verre ont une influence remarquable (**67**).

I.3.3 Propriétés électriques

Les verres ne sont pas conducteurs d'électrons comme les métaux, mais ce sont des conducteurs d'ions. A noter que la constante diélectrique d'un verre normal est entre 5 et 7 (**67**). A l'état solide et sec, les verres sont d'excellents isolants et diélectriques, mais il suffit que la surface du verre entre un instant en contact avec la vapeur d'eau pour que la résistance électrique diminue et qu'il y ait conductivité superficielle. Ces notamment le cas pour les verres riches en alcalis. De 200 à 300 C°, la conductivité électrique du verre augmente fortement, aux hautes températures elle atteint une valeur considérable.

1.3.4 Fragilité

La fragilité aux variations de température s'explique par un coefficient de dilatation élevé et une faible conductivité thermique. Un échauffement localisé provoque la dilatation d'une partie seulement de la masse d'où les tensions qui provoquent la cassure. Cette fragilité à la chaleur est d'autant plus grande que le verre est épais. Pour les récipients destinés à subir des changements de température, on utilise donc soit des verres très minces, se mettant très vite en équilibre de température, soit des verres peu dilatables (borosilicates) (67).

1.3.5 Propriétés chimiques

Etant donné que les verres sont des silicates minéraux, les produits organiques sont pratiquement sans action sur eux (avantage sur de nombreuses matières plastiques). En revanche, ils sont attaqués par les réactifs minéraux tels que l'eau, les acides et les bases. Il y aura toujours des échanges chimiques entre l'eau et le verre. Les cations Na^+ , K^+ , Ca^{2+} ... sont dans un état de mobilité relativement grande dans le réseau de silice, ce qui explique la possibilité de leur passage dans les solutions aqueuses qui se trouvent au contact du verre.

Les acides attaquent les verres en hydrolysant les liaisons oxygène-métal, mais l'attaque n'est pas profonde car il se forme une pellicule de silice hydratée insoluble. Les bases alcalines ont une action plus énergétique car elles dissolvent la silice elle-même, elles détruisent les liaisons Si-O qui forment le réseau semi-organisé du verre. Donc, avec l'eau et les acides, il y a seulement échange des cations entre le verre et l'eau mais les liaisons Si-O ne sont pas touchées, tandis qu'avec les bases, ces dernières sont attaquées et le verre est totalement détruit (67).

1.3.6 Réactions alcali-silice (RAS)

Les réactions alcali-silice et pouzzolanique impliquent les mêmes composés : silice, alcalin, calcium et hydroxydes et produisent toutes deux des gels amorphes. La réaction alcali-silice se produit en général dans un délai de l'ordre de plusieurs dizaines d'années après la fabrication du béton. Les minéraux composant les bétons peuvent présenter différentes formes de silices diversement réactives.

Les premiers points d'attaque sont les groupes silanol (Si-OH), qui réagissent avec les hydroxydes alcalins de la solution interstitielle (68). Des travaux antérieurs ont permis de montrer que la réaction alcali-silice est très affectée par la taille des granulats réactifs conduisant à un impact important sur les gonflements entraînés par la réaction alcali-silice (. Cependant la taille des granulats qui provoquerait des gonflements réactifs semble dépendre de leur nature.

D'autres études ont montré qu'il existe une teneur "pessimum" des granulats réactifs dans le béton qui causerait une expansion maximale, c'est le pessimum du rapport (granulats réactifs/alcalins) dans le béton qui est d'une importance critique. D'un autre côté, comme toute autre réaction, la réaction alcali-silice est sensible à la température qui a un purement cinétique se traduisant par la loi d'Arrhenius (68).

L'eau est aussi un ingrédient important pour la réaction alcali-silice car elle est à la fois le milieu de transport des espèces ioniques et fait partie des produits de la réaction. Sa disponibilité est donc un paramètre essentiel pour la réaction. Il est conclu que pour qu'il y ait alcali-réaction une humidité relative $> 80 \%$ est nécessaire, un rapport eau/ciment de 0,4 provoquerait aussi des expansions.

Ainsi, L'utilisation d'un ciment à basse teneur en alcalins ($< 0,6 \%$ $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$) est recommandé pour éviter ou réduire l'expansion. Hobbs recommande de limiter la quantité d'alcalins dans la composition des bétons à 3 kg/m^3 . Des inhibiteurs chimiques comme les sels de lithium sont également utilisés pour empêcher cette réaction, probablement en arrêtant la dissolution de la silice. L'utilisation de quantités appropriées de base, comme le NaOH, peut également réduire l'expansion. Le gel d'alcali-silice produit dans ce cas-ci serait trop liquide pour provoquer des pressions internes.

D'après certains auteurs, les agents entraîneurs d'air sont également indiqués pour réduire l'expansion du béton en créant des espaces libres pour les gels. Cependant la méthode la plus commune pour réduire (ou pour éviter) l'expansion est d'incorporer des matériaux pouzzolaniques (15-30 % du poids de ciment) ou l'utilisation des ciments de laitiers.

1.3.7 Réaction pouzzolanique

Pour les mélanges ciments (ou chaux) et pouzzolane, les plus importantes résistances mécaniques peuvent être obtenues quand le matériau pouzzolanique employé est plus actif et plus fin, et quand le mélange est mis au contact d'humidité.

L'addition de petites quantités de bases tel NaOH ou une température élevée s'avèrent de bons accélérateurs de la réaction pouzzolanique. La teneur en chaux, le rapport (eau/ciment) du mélange et le pH de la solution interstitielle sont également considérés comme facteurs influençant la réaction pouzzolanique (69).

I.4 Le verre de récupération

Le verre de récupération peut servir à la fabrication de granulats légers d'une masse volumique (528 kg/m^3), mais le béton expansé ainsi obtenu présente une résistance à la compression d'environ 17 MPa après une période de cure à la vapeur de 28 jours (70).

En général, la résistance du béton contenant du verre est inférieure à celle du béton contenant du gravier. Ce verre subit différents traitements : broyage, lavage, élimination des colles, étiquettes, capsules, séparation du verre et des métaux et élimination des rebuts (porcelaine, cailloux...) (71). Ce dernier, peut être produit presque indifféremment à partir de matière minérale vierge (silice) ou de calcin (verre broyé) de récupération. Il peut être traité par réemploi direct. Le verre récupéré, (exempt de polluants qui peuvent fragiliser les produits finis ou rendre le verre impropre à la commercialisation), se recycle sans aucune perte, ni qualitative, ni quantitative, il garde toutes ses propriétés mécaniques et physico-chimiques (72), (73).

Les débouchés du verre recyclé sont divers, le verre produit entre principalement dans la fabrication de nouvelles bouteilles, bocaux, pots, flacons, mais on peut aussi l'utiliser pour faire de la laine de verre, des abrasifs,...

Des travaux ont montré que l'utilisation du verre dans les bétons semble être une piste prometteuse pour un recyclage massif. En subissant un léger concassage, le verre peut être utilisé comme granulats dans le béton. Ce traitement a l'avantage de présenter un faible coût mais peut entraîner une réaction néfaste pour la structure. Un broyage prononcé laisse envisager une utilisation en tant que liant (74), (75) et la silice du verre réagit avec la chaux produite par la réaction du ciment en créant des composés dotés de propriétés liantes.

I.5 La mousse de verre

I.5.1 Définition

La mousse de verre (ou verre cellulaire) est un matériau écologique et innovant fabriqué à partir de verre pur. Il a une structure poreuse obtenue par un traitement thermique d'un mélange du verre recyclé (calcin) et des agents moussants à une température de 850°C .

I.5.2 Les granulats de mousse de verre

Le granulat de verre cellulaire est un nouveau matériau minéral de construction et d'isolation avec un large éventail de domaines d'application, produit à 100 % à partir de verre recyclé (71). La fabrication de granulés de verre expansé a commencé en Allemagne dans les années 60 et a débuté en France en 1973. Les granulés de verre produits en France sont d'une

composition entièrement minérale, de forme sphérique presque régulière, avec une structure cellulaire à pores fermés remplis d'un gaz incolore et non toxique (71) , (72).

1.5.3 Principes de fabrication et composition chimique des mousses de verre

Généralement, n'importe quel verre (sous forme de poudre) peut être transformé en un matériau cellulaire par l'ajout d'un agent moussant, à des températures au-dessus du point de ramollissement. La mousse de verre est obtenue par frittage dont le procédé de fabrication retenu est le pressage du mélange de la poudre de verre et de l'agent moussant à une humidité et une pression de compactage optimisées.

- a. Le calcin :** C'est la matière initiale pour la production de verre cellulaire, le type est varié selon le verre d'origine. Lotov, v et al (76) ont utilisé les déchets de verre creux, le verre de lampe (borosilicates) et le verre plat pour élaborer le verre cellulaire alors que Pascal G.Yota et Michel Ribes (76) ont utilisé les déchets de tube cathodique comme matière première pour préparer un verre cellulaire cristallin.
- b. Les agents moussants :** Spiridonov et Orlova (76) ont classé les agents moussants en deux classes : les agents moussants de neutralisation et les agents moussants de réduction.

Les agents moussants de neutralisation

Comprendre des sels (généralement des carbonates), qui se décomposent avec l'émission des gaz carboniques (CO_2) au cours du chauffage. Le dégagement intense de gaz pendant la décomposition d'agent neutralisant permet de casser les parois de différents pores. Parmi les carbonates utilisés par les chercheurs, on cite la dolomite (CaMgCO_3) avec une surface spécifique de $250 \text{ m}^2/\text{kg}$, le carbonate de calcium CaCO_3 , la craie, le carbonate de sodium (Na_2CO_3) qui donne des résultats moins importants que le (CaCO_3) et le mica dont l'utilisation de ce dernier permettait la formation des cellules par la déshydratation des molécules d'eau et l'augmentation de la résistance mécanique de la mousse de verre (77).

Les agents moussants réducteurs

Ils sont employés pour produire un verre spongieux thermo-isolant, c'est-à-dire un matériel en lequel ont scellé des pores règne. Tels agents moussants sont des matériaux contenant des carbonates : coke, graphite, carbonate de bois, et moins fréquemment carbure de silicium. La raison de l'émission de gaz en ces matériaux est la réaction d'oxydation du moussant par des gaz dissous dans la fonte de verre, de tels gaz sont principalement l'oxygène

et l'anhydride sulfurique. D'autres agents moussants sont utilisés par les chercheurs tels que le TiN à des quantités varie entre 4 et 9%, le nitrate d'aluminium et le MnO_2 (77).

I.5.4 Les caractéristiques des granulats de mousse de verre

Les granulats de verre cellulaire sont insensibles aux agents atmosphériques habituels, résistent à tous les solvants organiques et à tous les acides communément utilisés, ainsi qu'à leurs vapeurs, sauf à l'acide fluorhydrique. La composition entièrement minérale des granulats de verre cellulaire en fait un matériau totalement incombustible.

Tableau II.3 : Quelques caractéristiques des granulats du verre expansé

Caractéristiques	Valeurs
masse volumique (kg/m^3)	130 à 150
conductivité thermique ($w/m. ^\circ C$)	0.041 à 0.48
résistance à la compression (kg/cm^3)	5 à 30
température limite d'utilisation ($^\circ C$)	-250 à +450
température de ramollissement ($^\circ C$)	600
pouvoir calorifique ($kcal/kg$)	0

I.5.5 L'utilisation des granulats de mousse de verre dans le béton

Plusieurs travaux ont été conduits dans les années soixante sur l'utilisation du verre comme granulats dans les bétons. Cependant ces travaux ont montré que tous les bétons ont gonflé et fissuré. Depuis, l'idée a été en partie abandonnée. Ce n'est que vers ces dernières années que le sujet est redevenu d'actualité. En effet, pour des raisons économiques et environnementales, l'utilisation du verre recyclé dans les ciments et bétons a suscité l'intérêt d'innombrables décideurs.

Récemment, les travaux de Mukesh Limbachiya et al (78) se sont intéressés à l'utilisation de la mousse de verre granulé par substitution en volume des granulats naturels pour produire du béton dans le but d'élaborer du béton léger à base des granulats de mousse de verre en tant que sable et gros granulats. Les granulats de mousse de verre utilisés dans leur étude, ont été produits à partir de déchets de verre de bouteilles de couleurs différentes. Ils ont étudiés l'effet de diverses proportions de granulats de mousse de verre grossier (30%, 40%, 50%, 60% ; et 100%) et granulats fins (5%, 10% et 15%) sur les propriétés du béton à l'état frais et à l'état durci. Une série de mélanges de béton ont été dosées avec des rapports eau-ciment (E/C) de 0,40 – 0,55 – 0,62 - et 0,76 (78). Ils ont constaté que l'incorporation des

granulats de mousse de verre soit comme granulats fins (sable) ou grossier (gravillon), n'a pas montré une grande influence sur les valeurs d'affaissement initiales des mélanges des mortiers/bétons étudiés. Ces auteurs ont constaté une faible diminution de la fluidité des mortiers et de l'ouvrabilité des bétons.

D'autres parts, l'utilisation des granulats de mousse de verre comme gros granulats dans le béton (comme un remplacement partiel ou total de l'agrégat naturel) diminue la résistance à la compression par rapport au mélange de béton de référence. En effet, la résistance à la compression obtenue avec des mélanges des bétons avec le rapport E/C de 0,76 et contenant 30 et 40 % de gros granulats de mousse de verre ont montré une réduction significative de la résistance à la compression par rapport à la composition du béton témoin.

En ce qui concerne le module de Young des bétons à base de granulats de mousse de verre Limbachiya et al (78) ont mesuré ce paramètre après 28 jours de durcissement. Ils ont constaté que pour chaque rapport E/C, l'augmentation de la proportion de gros granulats de mousse de verre dans le mélange de béton entraîne une réduction significative du module d'élasticité par rapport à la composition du béton témoin jusqu'à un taux de substitution de 30 %, pouvant être considéré comme le montant maximal à ajouter sans effet négatif majeur sur le module d'élasticité du béton à base des granulats légers.

Concernant l'analyse de l'interface des granulats de mousse de verre et la matrice cimentaire à l'intérieur du béton, des analyses par MEB ont été effectuées par Bumanis et al (79) sur des spécimens d'un béton léger à base des granulats de mousse de verre. Après 28 jours de durcissement, les auteurs ont observés que l'interface de la matrice cimentaire et les granulats de mousse de verre est très compacte (bonne adhérence) avec une forte présence des pores.

II. DECHETS DE BRIQUES REFRACTAIRES

II.1 Définition

Les déchets de briques sont des matériaux inertes vis-à-vis de l'environnement et de la santé humaine. Ils sont admissibles dans les installations de stockage et proviennent essentiellement des chantiers de bâtiment et de travaux publics ou d'industries de fabrication de matériaux de construction.

Les briques réfractaires se retrouvent de plus en plus souvent dans les dépliants des fournisseurs et des fabricants tant de cheminées que de barbecues et de fours. La brique réfractaire est conçue pour résister à la chaleur. Selon son utilisation, elle sera composée de vermiculite, de ciment fondu et de coulis réfractaire dans différentes proportions. En plus de

résister à la chaleur, la brique réfractaire a également la capacité de restituer la chaleur. C'est ce que l'on appelle la convection et c'est un élément majeur du succès de la brique réfractaire. (80)

II. 2 Domaine d'utilisation

La brique réfractaire est utilisée principalement pour les constructions destinées à résister à une source de chaleur directe ou indirecte :

- le barbecue fixe
- les cheminées, les foyers de cheminée
- les fours (à pain, à pizza, etc.)
- les chaudières, les forges
- les murs proches d'un poêle ou d'une source importante de chaleur

II.3 Principaux types de briques réfractaires

Les principaux types des briques réfractaires sont :

II.3.1 Brique ordinaire

Une brique d'argile est une roche artificielle ayant la forme parallélépipédique rectangle de dimensions bien déterminées. Généralement, on fabrique les briques suivant deux procédés : procédé plastique (l'argile est humectée d'eau de 20 à 25 %) et procédé demi-sec (l'argile est humectée d'eau de 8 à 12 %). Après moulage et séchage, les briques sont cuites pour qu'elles deviennent assez dures. La cuisson est faite soit dans un four périodique ou dans un four continu.

En général, les dimensions d'une brique ordinaire sont : 250 x 120 x 65 mm. Selon la technologie de fabrication des briques traditionnelles, il est difficile d'obtenir des briques ayant des dimensions exactement précises, à cause du retrait à l'air et du retrait de cuisson. Selon la Norme, les tolérances sur les briques peuvent être calibrées de la manière suivante : ± 6 mm sur la longueur ; ± 4 mm sur la largeur et ± 3 mm sur l'épaisseur. (81)

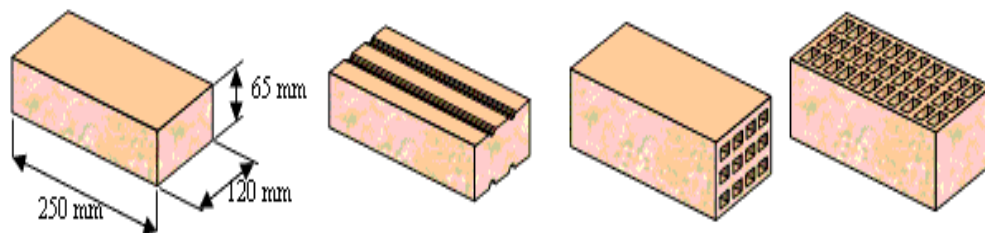


Figure II.1 : Briques pleines et perforées

II.3.2 Brique poreuse

Les briques poreuses peuvent être fabriquées par la technologie traditionnelle en utilisant les argiles ordinaires, auxquelles on ajoute des additions telles que : la sciure de bois, la tourbe pulvérisée et le charbon pulvérisé. L'emploi des briques poreuses permet de réduire le prix des murs. Cependant dotés de faible résistance, ce type de briques ne peut pas être utilisé pour construire des murs supportant de fortes charges. Elles seront plutôt employées pour le remplissage des bâtiments à ossature métallique ou béton armé. (82) (83).

II.3.3 Briques d'argiles creusées à perforations

Les briques creusées qui comportent au moins quatre conduits non débouchant sont fabriquées par voie demi-sèche. Ces dernières doivent avoir les dimensions suivantes : 250 x 120 x 88 mm ou bien 65mm. On fabrique les briques à 8 et 18 conduits dont les diamètres sont de 35-45 mm et de 17-18 mm. Les trous de la perforation sont faits soit verticalement dans la proportion de 60 % de la section totale, soit horizontalement avec alvéoles parallèles au lit de pose dans la proportion de 40 % de la section totale .On a quatre marques: 150, 125, 100 et 75. La capacité d'absorption d'eau d'une brique creusée à la même valeur que pour la brique ordinaire donc $> 8 \%$ et sa résistance à la flexion est de 20, 18, 16 et 14 kg/cm². Toutes les autres prescriptions techniques imposées aux briques creusées sont les mêmes que pour les briques ordinaires.

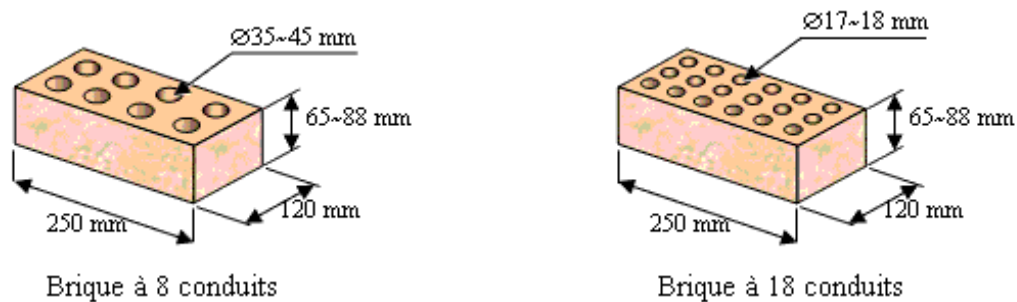


Figure II.2: Briques creusées comprimées par voie demi-humide.

II.4 L'effet d'une source de chaleur sur les briques réfractaires

Les matériaux réfractaires (briques réfractaires) possèdent une forte inertie thermique. Exposés à une source de chaleur, ils chauffent lentement, et une fois à température élevée, ils refroidissent lentement. Placée au contact d'une flamme ou d'un plasma, une plaque réfractaire permet aux parois des fours de contenir la source de chaleur, en particulier en restreignant l'expansion des zones à températures très élevées qui pourraient altérer tout ou une partie des parois du four.

Comme ces matériaux sont souvent de mauvais conducteurs de la chaleur, ils diminuent la déperdition calorifique d'un système de chauffage ou assurent une appréciable isolation thermique. Cette inertie thermique est caractérisée par un coefficient appelé capacité thermique: c'est l'énergie qu'il faut apporter à un matériau pour augmenter sa température relative d'un kelvin.

II.5 Les caractéristiques physico-chimiques des briques réfractaires

Une brique réfractaire est caractérisée par une :

- résistance à l'usure par abrasion
- résistance gyroscopique (En °C)
- résistance mécanique à froid (En kg/cm²)
- masse volumique (En g/cm³)
- porosité ouverte (En %)
- résistance à l'écrasement à froid (En N/mm²)
- conductibilité thermique (Kcal/h.m.°C)
- dilatation linéaire moyenne entre 0 et 1,000 °C, à 500 °C, à 800 °C
- résistance aux chocs thermiques, trempé à l'air à 1200 °C (en cycle).

III. LE SABLE DE DUNE

III.1 Introduction

Les sables sont classés en fonction de leurs grosseurs déterminées par criblage sur des tamis à mailles carrées en :

- sables fins : 0 à 0,315 mm
- sables moyenne : 0,315 à 1,25 mm
- sables grossiers : 1,025 à 5 mm

La classe granulaire est définie par deux dimensions d'ouverture de mailles carrées avec des conditions déterminées de tamis et de refus, la dimension D, telle que définie dans la norme NA 1947, doit être inférieure ou égale à 5 mm et dans ce cas le refus sur le tamis D doit être compris entre 1 et 15% et le refus sur le tamis 1,58 D doit être nul.

Le module de finesse M_f est défini comme étant au centième de la somme des refus aux tamis 0,16 ; 0,315 ; 0,63 ; 1,25 ; 2,5 ; 5 mm. Le module doit être compris entre (1,8 - 3,2). Il permet de juger globalement la granularité d'un sable, mais il n'est pas utilisé seul pour décrire cette granularité, il faut le rattacher à un tracé granulométrique pour qu'il soit d'une

indication plus précise. L'expérience actuelle montre que les meilleurs sables sont ceux qui présentent une courbe granulométrique continue et régulière.

Des recherches sur l'influence de la finesse des sables sur les qualités du béton ont conduit à délimiter certains modules de finesse admissibles :

- $1,8 < M_f < 2,2$: facilité de mise en œuvre au déterminant probable de la résistance.
- $2,2 < M_f < 2,8$: ouvrabilité satisfaisante et bonne résistance avec une ségrégation limitée.
- $2,2 < M_f < 3,2$: résistance élevées, mais moyenne ouvrabilité et des risques de ségrégation.

III.2 Définition d'un sable de dune

Le sable est un produit de la désagrégation lente des roches sous l'action des agents d'érosion tels que l'air et la pluie. Les déserts de sable, ou ergs, se localisent dans les vastes cuvettes d'épandage ou des puissantes accumulations alluviales se sont concentrées par de grands écoulements liés aux périodes pluviales du début du quaternaire. Les grands ergs coïncident avec des zones où des vents saisonniers de directions variées se compensent.

Les dunes existent sous trois formes (la barkhane, la dune parabolique, et les siouf ou sif). D'après plusieurs études réalisées dans les régions sahariennes du pays, les sables dunaires ont pour origine la désagrégation des roches sous l'effet conjugué des chocs thermique et de l'altération des sols constituant les lits d'oueds ou d'anciens fleuves.

Le sable est considéré comme un sédiment détritique meuble composé, en l'absence totale de ciment, de grains jointifs mais libres, dont la taille est comprise entre 64 μm et 2 mm. La valeur de cet intervalle diffère d'ailleurs suivant les auteurs : entre 20 μm et 2 mm pour Folk (84), et entre 50 μm et 5 mm pour Weydert (85).

Le sable est composé de différents minéraux, tels que la silice, les silicates, les carbonates et les argiles. Les sables de dunes étudiés sont essentiellement des sables siliceux, les carbonates et les argiles se trouvant sous forme de traces.

III.3 Caractéristique des sables de dune

Afin de caractériser les sables de dune et savoir leur possibilité à être utilisés dans le domaine de construction, une série d'essais a été effectuée sur les sables de dune de différentes régions du pays (Taghit, Igli, Béni abbes, ouled Saïd, Boussaâda,...etc)

L'analyse granulométrique a montré que la totalité des sables de dune sont de natures très fines, les courbes se situent au-dessus des fuseaux limites.

Avec un D_{max} qui ne dépasse pas 1mm, ils sont classés dans la famille des sablons conformément à la norme XP P18-540.

Leur module de finesse est compris entre 0,73 (Sable de Hassid Bah bah) et 1,38 (Sable d'Ouargla). Ces valeurs sont inférieures à la valeur spécifique (Vis) de 1,8.

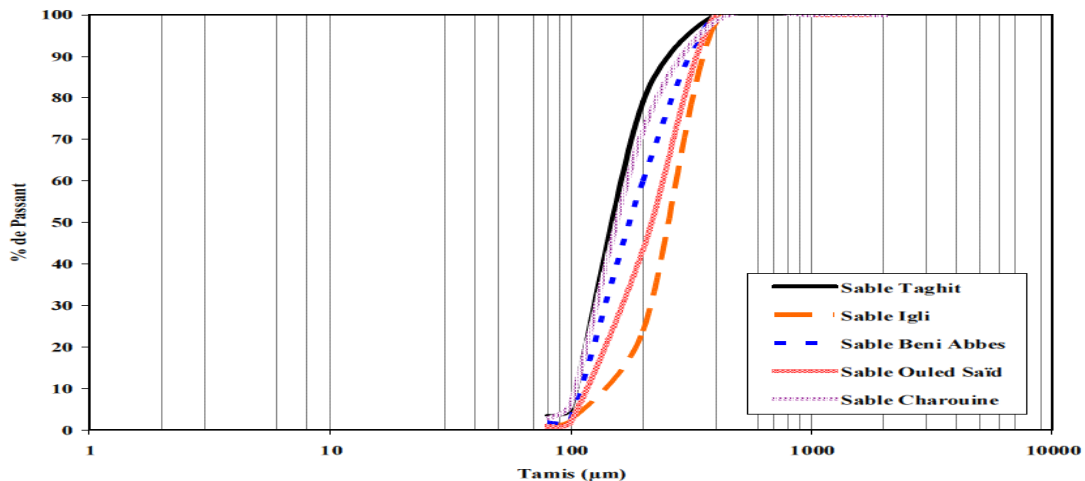


Figure II.3 : Courbe granulométrique des différents échantillons de sable de dune

Conformément à la norme XP P18-540, les sables des dunes sont considérés comme des sables courants car ils présentent une masse volumique réelle supérieure à $2t/m^3$ (entre 2416 et 2496 K/m^3 environ).

D'après ces études (86), les valeurs de propreté des sables obtenues au piston sont supérieures à 70%. Ces sables peuvent être considérés comme des sables propres, et ce conformément à la norme XP P18-540 qui exige une valeur minimale de 65%. Les sables de dune ne présentent également aucune trace de matières organique. Pour les sulfates, ils sont de proportions très faibles inférieures à la valeur exigée par la norme (0,03 à 0,05). Certains sables ne contiennent pas de sulfates comme les sables de Boussaâda, de Laghouat et d'El Oued. Quand à la proportion des chlorures, elle varie entre 0,01 et 0,05%. Le sable de Touggourt est particulier car il contient des cristaux de gypse ($SO_4.2H_2O$).

III.4 Utilisation des sables de dune dans les bétons

Un travail a été entrepris par le CNERIB afin de définir les caractéristiques du mélange de (sable de dune –liant) à l'état frais et durci. Les méthodes de composition prévoient toute une correction granulométrique des sables par adjonction des fines. En effet, les sables de dune recèlent en eux un volume important de vide jusqu'à 40% du volume total. Pour cela, des fillers calcaires et des adjuvants type super plastifiants ont été ajoutés afin d'améliorer les performances de béton de sable. Les résultats obtenus montrent une résistance à la compression

variant de 14 à 20 MPa, un faible ressuage et un retrait de l'ordre de 1,5 fois de celui du béton traditionnel.

VI. LA FUMÉE DE SILICE

La fumée de silice est de finesse supérieure à celle des ciments, composée de particules sphériques de dioxyde de silicium amorphe, de diamètre moyen de l'ordre de 0,1 μm et de très grande surface spécifique, et hautement pouzzolanique. Il s'agit d'un coproduit, recueilli sur des filtres, du processus de fusion permettant de produire du silicium métal et des alliages de ferrosilicium. Ses caractéristiques générales sont présentées dans le (*Tableau II.4*) suivant :

Tableau II.4 : Caractéristiques générales de la fumée de silice (36)

CARACTERISTIQUES	VALEURS
Masse volumique (kg/m^3)	2200
Surface spécifique (m^2/kg)	12000 – 20000
SiO_2 (%)	> 85
Dimension des grains (μm)	0,03 – 0,3

La teneur en carbone de la fumée de silice est préjudiciable puisqu'elle engendre une augmentation de la demande en eau et entraîne une diminution de la fluidité du matériau à l'état frais (il existe sur le marché des fumées de silice blanche exemptes de carbone mais qui sont très chères). Elle influe aussi sur la teinte de la fumée de silice qui a un impact important sur la couleur du béton en raison de son extrême finesse. La fumée de silice est un coproduit industriel assez cher (> 250 € / tonne) et peu disponible. Elle peut être remplacée par d'autres particules fines et ultrafines telles que les roches micronisées (quartz, calcite, diatomite), la fumée de titane, les cendres volantes, les laitiers de haut fourneau et les métakaolins. Toutefois, l'utilisation actuelle de ces particules dans la formulation des nouveaux bétons demeure marginale.

V. LES DECHETS MARINS (LES COQUILLES DE MER)

V.1 Minéralogie et structure de la coquille

La coquille des mollusques est constituée d'un assemblage intime et complexe de carbonate de calcium (CaCO_3) qui représente en moyenne plus de 95 % en poids et moins de 5 % de matière organique (protéine). Le carbonate de calcium qui est fabriqué par l'animal pour faire sa coquille peut avoir deux formes minéralogiques : la calcite et l'aragonite, qui restent toujours associées à la matière organique. La calcite et l'aragonite, n'ont pas la même

organisation au niveau de leur réseau cristallin. La calcite se cristallise dans le système rhomboédrique tandis que l'aragonite se cristallise dans le système orthorhombique.

Chaque espèce de mollusque a une structure bien définie. Certains mollusques ont une coquille entièrement en calcite, d'autres entièrement en aragonite. Il est possible de trouver une association des 2 types de minéraux qui forment alors des couches distinctes au sein de la coquille. A titre d'exemple, la coquilles Saint-Jacques est calcitique, la coquille des amandes de mer est aragonitique alors que la coquille des moules est constituée d'une couche aragonitique et d'une couche calcitique.

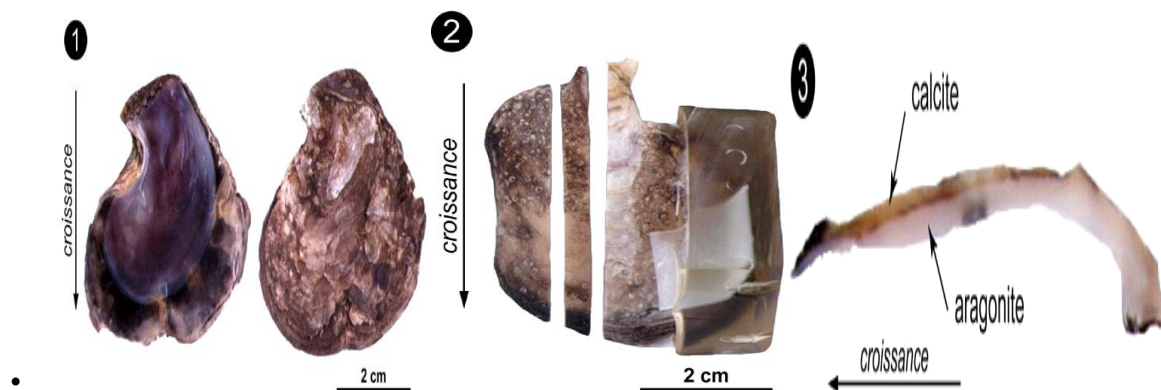


Figure II.4 : Exemple de coquille de bivalve

D'autre part, la microstructure des "biocristaux" au sein d'une couche est différente selon les espèces et ce pour chaque type minéralogique (calcite et aragonite) (87). Ces microstructures peuvent parfois être observées au microscope optique mais il est souvent nécessaire pour une identification plus sûre d'utiliser un microscope électronique à balayage (MEB) sur des sections spécialement préparées (cassure, section attaquée avec un acide léger). La majorité des couches calcitiques des mollusques ont une microstructure dite prismatique alors que la variété des microstructures aragonitiques est plus grande.

V.1.1 Biominéraux calcitiques

Vue la microstructure de la coquille de l'huître, les 2 couches (aragonitique et calcitique) sont présentes. On observe déjà la structure prismatique de la couche calcitique externe. Ces prismes sont particulièrement bien mis en évidence le long d'une fracture observée au MEB. Quand à la couche aragonitique interne, elle présente une microstructure dite nacrée. (Figure II.5).

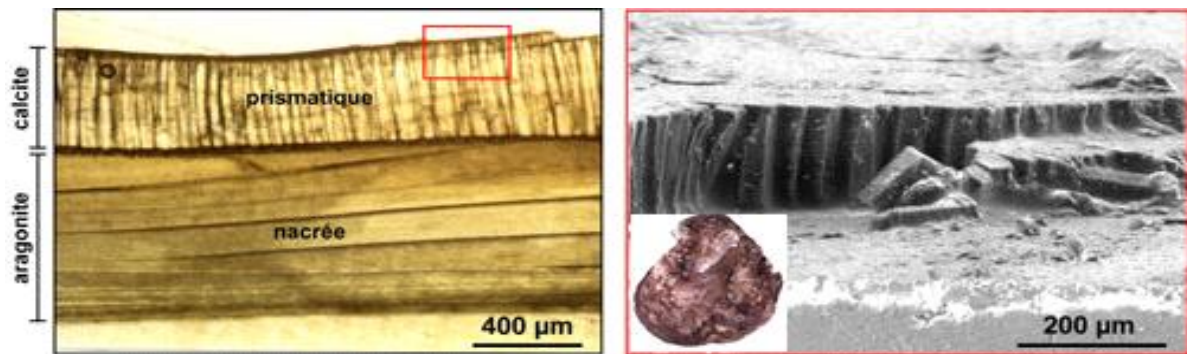


Figure II.5 : Microscopie optique (a) et électronique à balayage (b) d'une coquille calcitique

V.1.2 Biominéraux aragonitiques

Dans le biominéraux aragonitiques, la couche externe de ce bivalve est prismatique tandis que la couche interne est dite homogène. La (Figure II.6) illustre la microscopie d'une coquille de *Trachycardium procerum*, bivalve et entièrement aragonitique, d'une microstructure lamellaire croisée. Ce sont les changements d'orientation des lamelles aragonitiques particulièrement bien visibles sur la photographie, qui donnent cet aspect "peau de zèbre".

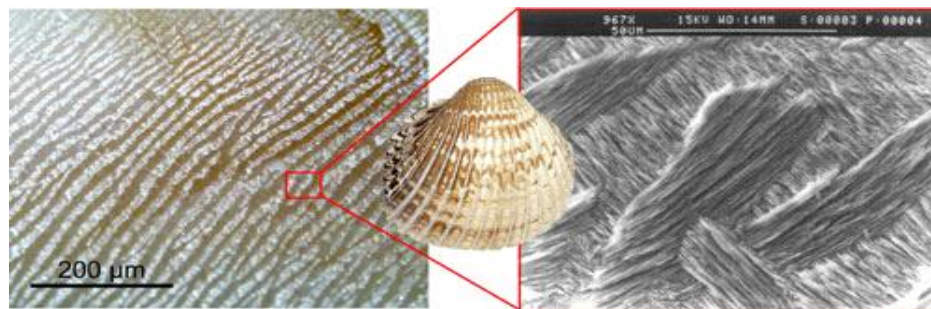


Figure II.6 : Microscopie optique (a) et électronique à balayage (b) d'une coquille aragonitique

V.1.3 Les constituants organiques

Il est possible d'identifier les phases organiques présentes au sein des coquilles. Pour cela, il faut éliminer le composant calcaire en utilisant des acides par décalcification. Les composés organiques ainsi recueillis ont des propriétés différentes et se divisent en deux grandes classes, les composés organiques solubles et insolubles. Cette matrice organique est constituée de protéines et de glucides. Certains polysaccharides sulfatés sont même impliqués dans le processus de nucléation des cristaux au moment de la formation des coquilles de mollusques (87).

V.2 Types de coquilles de mer

Il existe plusieurs variétés de coquilles de mer. Le Coques, connue pour sa forme de spirale logarithmique, présente le plus haut niveau de l'organisation de la structure entre les autres coquilles connues :

- coque Bucarde aiguillonnée
- coque Bucarde rouge
- coque Bucarde tuberculée
- coque glauque

V.3 Recyclage des coquilles de mer

Des travaux ont été initiés pour recycler les déchets marins tels que les coquilles de mer ces dernières années. Les résultats de caractérisation de ce type de déchets, a montré qu'ils contiennent un pourcentage élevé en oxyde de calcium (CaO), ils ont conclu que ces coquilles peuvent être comme source appropriée de matières premières pour la production de suppléments de calcium par l'industrie alimentaire indigène.

L'utilisation d'huîtres et de coquilles pour le traitement de l'eau contaminée par l'arsenic et par d'autres métaux lourds a été aussi démontrée par les auteurs Badmus et al (88). Ces déchets ont été utilisés pour la production d'adsorbants pour le traitement de l'hypertension COD et l'élimination du plomb dans les eaux usées industrielles (88).

V.4 Recyclage des coquilles de mer dans les bétons

Une des utilisations prometteuses des déchets de coquilles est comme granulats (gravillons) dans le béton ou ajout filler dans la fabrication du ciment aux ajouts, dans le domaine des matériaux de construction.

Une étude a été récemment menée par Dang Nguyen et al (87), pour recycler les coquilles de mer comme gros granulats pour la fabrication du béton ordinaire.

Les résultats de leurs travaux, ont montré que ces déchets peuvent donner des bétons de pavement (ou chaussée) dont les caractéristiques physico-mécaniques sont acceptables. Les coquilles utilisées dans cette étude, ont un potentiel pour être utilisé comme agrégat pour donner un béton de résistance à la compression de 16 MPa pour les travaux des pavements.

Dahunsi et al (87) a montré que la résistance à la compression du béton à base de coquille comme gravillons, était plus faible rapport à ceux conçus avec 100 % de gravillons, mais plus léger que ces derniers.

En 2013, un travail est effectué par Alan Elliott Richardson (87), sur l'utilisation d'un produit de coquille de mer (déchets marins) incorporé comme granulat dans un béton ordinaire par remplacement total (sable ou gravier). Les résultats ont montré une réduction de la résistance à la compression lorsque 50 % de coquillages ont été utilisés comme un remplacement total, à la fois pour le sable et le gravier, par rapport à l'échantillon témoin. Egalement, les coquillages concassés utilisés dans le béton ont données une faible porosité par conséquent une faible perméabilité du béton.

VI. CONCLUSION

L'état de l'art sur l'utilisation de mousse de verre dans les bétons nous a permis de conclure que ces granulats ont des caractéristiques très importantes à savoir la légèreté qui les recommandent pour une utilisation dans la fabrication des bétons légers ayant des propriétés très intéressantes dans le domaine des bétons spéciaux tels que les bétons dites cellulaires. Cependant, selon cette étude bibliographique, il serait très intéressant d'utiliser les granulats de mousse de verre dans d'autres types des bétons comme le cas des bétons autoplaçants pour produire des éléments en bétons légers ou cellulaires.

ETUDE EXPERIMENTALE

Chapitre 3 : Recyclage des déchets de verre dans les mortiers autoplaçants

Ce chapitre a pour objectif de voir l'influence des granulats légers à base de mousse de verre sur les propriétés rhéologiques et physicomécaniques du mortier autoplaçant. Les granulats de mousse de verre, seront préparés à partir de la poudre de verre (calcin) et d'un agent moussant (calcaire) selon un traitement thermique adéquat (850°C pendant 20min). Après la préparation des granulats légers, des mortiers autoplaçants seront élaborés à base des granulats fins (sable), puis d'autres variantes de mortiers autoplaçants en substituant le sable par les granulats de mousse de verre à des rapports (0, 30, 50 et 100% en masse) seront également conçus. Des essais de caractérisation rhéologique (fluidité) et physicomécaniques (masse volumique, porosité/absorption d'eau, tests ultrasoniques et résistances mécaniques) seront réalisés sur ces mortiers. Les résultats ainsi obtenus, seront comparés avec les caractéristiques d'un mortier autoplaçant témoin (sable naturel).

I. INTRODUCTION

De nos jours, le béton doit répondre à des exigences plus sévères en matière de performances mécaniques, de durabilité, d'ouvrabilité et d'aspect. Dans ce but, les recherches continues ont permis l'émergence des bétons spéciaux tels que le béton autoplaçant. Ce dernier est qualifié d'autoplaçant lorsque le matériau final répond à certaines exigences à l'état frais et à l'état durci. Ainsi sa formulation doit au moins contenir un adjuvant chimique et un ajout minéral pour satisfaire les conditions de maniabilité et de stabilité.

Le verre est un matériau qui peut être recyclé plusieurs fois. La plupart du temps, le verre récupéré est un produit mixte et sa réutilisation peut devenir difficile. Dans ce cas, il est employé pour d'autres applications (abrasif routier, laine de verre, filtrations municipales...) ou stocké en décharge. (89).

Pour réaliser ce travail, la méthodologie suivie et les différentes caractéristiques des constituants utilisés, seront présentées dans ce chapitre. Il est évident que la connaissance des caractéristiques de ces matériaux, est impératives à toutes recherches, parce que chaque composant pourrait influencer considérablement sur les résultats finales, d'où une caractérisation initiale avant utilisation.

II. OBJECTIFS

Notre but est d'étudier l'influence des granulats légers à base du verre mousse sur les propriétés rhéologiques et physico-mécaniques du mortier autoplaçant léger. Les granulats du verre mousse de verre, seront préparés à partir de la poudre de verre (calcin). Le sable est substitué par les granulats de la mousse de verre concassé (0 à 5 mm), à des teneurs volumiques (0, 30, 50, et 100 %). Ce travail a donc un double objectif : économique en remplaçant le sable par les déchets de verre, et par conséquent, avoir un mortier autoplaçant de bonne qualité, comparable à celui du mortier témoin (sable) et environnemental, recyclage d'un déchet industriel stocké.

III. CARACTERISTIQUES ET IDENTIFICATION DES MATERIAUX UTILISES DANS CETTE ETUDE

III.1 Le ciment

C'est un ciment portland composé, de type CEM II/A 42.5. Sa masse volumique absolue et sa finesse sont respectivement 3,14 (g/cm³) et 3347 (cm²/g), il provient de la cimenterie de ZAHANA(ORAN). Ses caractéristiques physiques, mécaniques, chimiques et minéralogiques sont présentées dans les tableaux ci-dessous respectivement :

Tableau III.1 : Caractéristiques physiques du ciment utilisé

Caractéristiques physiques	Valeurs	
Consistance normalisée (%)	H ₂ O	25
Temps de prise (min)	Début	210
	Fin	300
Essai de retrait (µm/m)	3 jours	191
	7 jours	459
	28 jours	644
Essai de gonflement (µm/m)	3 jours	0
	7 jours	0
	28 jours	0
Masse volumique absolue du ciment (g/cm ³)		3,14
Finesse suivant la méthode Blaine (cm ² /g)		3347

Tableau III.2 : Caractéristiques mécaniques du ciment utilisé

L'essai mécanique	Echéance en jours		
	2 jours	7 jours	28 jours
La résistance à la flexion (N/mm ²)	3,5	5,9	6,8
La résistance à la compression (N/mm ²)	14,2	28,9	43,8

Tableau III.3 : Composition chimique du ciment utilisé

Eléments	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO ₃	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	CaO		Cl ⁻	Insoluble	P.F
(%)	2.58	23.71	6.34	4.26	1.61	0.62	0.94	58.00	0.852	0.024	8.16	1.280

Tableau III.4 : Composition minéralogique du ciment utilisé

Composant	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	CaO.L	Gypse	pouzzolane
(%)	53	23	06	12	01	05	10

III.2 Le filler de calcaire

Le filler de calcaire utilisé est d'origine d'EL-KHROUB (CONSTANTINE) qui occupe la partie sud-ouest du massif Oum Settas au nord-est de Constantine. Sa masse volumique est de 2,70 g/cm³ et sa finesse est de 5831 cm²/g. Il est de calcaire d'origine biochimique nitrique caractérisé par une grande pureté chimique et une blancheur élevée. Les carbonates de calcium, broyés et tamisés à 200 µm. Ses caractéristiques chimiques, physiques et minéralogiques sont présentées dans les tableaux ci-dessous :

Tableau III.5 : Analyse chimique du calcaire

Composant	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO ₃	CaO	SO ₃	K ₂ O	MgO	P ₂ O ₅	Na ₂ O	PAF
(%)	3,95	0,20	0,35	51,85	0,02	0,01	1,22	0,03	0,25	42,12

Tableau III.6 : Propriétés physiques du calcaire

Caractéristiques	Valeurs
La masse volumique absolue (g/cm ³)	2,70
La finesse suivant la méthode Blaine (g/cm ²)	5831

Tableau III.7 : Analyse minéralogique du calcaire

Le composant	Quartz	calcaire	Dolomite CaMg(CO ₃)
Le pourcentage (%)	04	90	06

III.3 Le superplastifiant

L'adjuvant utilisé est un superplastifiant haut réducteur d'eau dit (MIDAFLOW 30) fabriqué par GRANITEX. Il est à base de polycarboxylates et ne présente pas d'effet retardateur.

III.4 Le sable

Le sable utilisé est un sable lavé et concassé de Baghlia (BOUMERDES), d'une masse volumique de 2,58 g/cm³. Après le traitement du sable, on a obtenu les résultats des essais physiques et granulométriques suivants :

Tableau III.8 : Composition chimique du sable

Eléments	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	SO ₃	K ₂ O	MgO	P ₂ O ₅	Na ₂ O	PAF
(%)	67,90	4,22	4,41	11,35	0,02	0,35	1,22	0,11	0,51	10,42

Tableau III.9 : Composition minéralogique du sable

Les composants	Le pourcentage(%)
Quartz (SiO ₂)	63
Calcite (CaCO ₃)	20
Dolomite CaMg(CO ₃) ₂	-
Albite (NaAlSi ₃ O ₈)	04
Illite (2K ₂ OAl ₂ O ₃ ·24SiO ₂ ·2H ₂ O)	03
Kaolinite (Al ₂ SiO ₅ (OH) ₄)	06
Minéraux ferrugineux + autres	04

Tableau III.10 : Caractéristiques physiques du sable

Caractéristiques physiques	Valeurs
Masse volumique réelle (g/cm ³)	2,53
Masse volumique imbibée (g/cm ³)	2,58
Masse spécifique (g/cm ³)	2,70
La teneur en eau (%)	0,4
EVS (%)	75
Taux d'absorption (%)	1,14

Tableau III.11 : Analyse granulométrique (par tamisage) du sable lavé

refus cumulés Ri(g)	refus cumulés (%)	tamisât cumulés (%)
0	0,0	100,0
14	1,0	99,0
153	10,5	89,5
248	17,0	83,0
418	28,6	71,4
519	35,6	64,4
790	54,1	45,9
865	59,3	40,7
1026	70,3	29,7
1085	74,4	25,6
1177	80,7	19,3
1217	83,4	16,6
1335	91,5	8,5
1404	96,2	3,8
1414	96,9	3,1
1416	97,1	2,9

III.5 Les granulats de mousse de verre

Après la collecte, le triage et le lavage des déchets de verre, on a fait le concassage puis le broyage à l'aide d'un broyeur à boulet. Après 30 minutes, la poudre obtenue est passée à travers d'un tamis de 200 μm .

Les caractéristiques chimiques et physiques de la poudre obtenue (le calcin) sont données dans les tableaux ci-dessous :

Tableau III.12 : Caractéristiques chimiques du calcin

Eléments	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	SO ₃	K ₂ O	MgO	P ₂ O ₅	Na ₂ O	PAF
(%)	73,52	0,86	0,40	10,00	0,22	0,53	1,90	0,01	11,52	0,01

Tableau III.13 : Caractéristiques physiques du calcin

Caractéristiques physiques	Résultats
Masse volumique absolue (g/cm ³)	2,3
Finesse suivant la méthode Blaine (g/cm ²)	2140

III.5.1 *Élaboration des granulats de mousse de verre*

Pour l'élaboration des granulats de mousse de verre, on a ajouté au mélange : (calcin 97%) + (calcaire 3 %), une quantité d'eau de 35 – 40 % jusqu'à l'obtention d'une pâte modelable (76). Les granulats de forme sphérique et de différents diamètres sont façonnés manuellement.

Le régime thermique choisi pour l'élaboration de ces granulats, consiste à augmenter linéairement la température avec une vitesse constante (8°C/min). Quand on arrive à 850°C, on fixe la température pendant 20 minutes, ensuite, on laisse refroidir la poudre à l'intérieur du four (refroidissement très lent) pour acquérir une bonne résistance mécanique.

Les granulats ainsi formés sont illustrés dans la figure ci-dessous :



Figure III.1 : Granulats de la mousse de verre obtenus après le traitement thermique

III.5.2 Les caractéristiques de la mousse de verre

Les caractéristiques chimiques, physiques et granulométriques des granulats de la mousse de verre sont regroupées dans les tableaux suivants :

Tableau III.14 : Composition chimique de la mousse de verre

Eléments	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	SO ₃	K ₂ O	MgO	P ₂ O ₅	Na ₂ O	TiO ₂	PAF
(%)	72,15	1,01	0,39	11,72	0,24	0,53	1,82	0,01	11,51	0,02	0,60

Tableau III.15 : Caractéristiques physiques de la mousse de verre

Caractéristiques	Résultats
Masse volumiques réelle (g/cm ³)	0.5
Masse spécifique (g/cm ³)	-

Tableau III.16 : Analyse granulométrique par tamisage de la mousse de verre

ouverture du tamis (mm)	la masse des refus cumulés Ri (g)	Pourcentage refus cumulés (%)	Pourcentage tamisât cumulés(%)
5	0	0	100
4	85	19,81	80,19
3,15	93	21,67	78,4
2,5	115	26,80	73,2
2	128	29,83	70,2
1,25	158	36,82	63,18

1	169	39,39	60,7
0,63	199	46,38	53,7
0,5	219	51,04	49
0,315	253	58,97	41,1
0,25	266	62,00	38
0,125	337	78,55	21,5
0,08	359	83,68	16,4
0,063	365	85,08	15
Fond de tamis	368	85,78	14,3

Module de finesse de mousse de verre $M_f = 2,80$

III.5.3 La microstructure des granulats de la mousse de verre

Afin d'estimer la surface des granulats de la mousse de verre avant leur utilisation dans le mortier, nous avons procédé à l'analyse de la microstructure via la microscopie électronique à balayage MEB.

VI. FORMULATION DES MORTIERS AUTOPLACANTS

En premier lieu, nous avons procédé à la formulation d'un béton autoplaçant (BAP) selon la méthode japonaise (90). Le calcul des compositions du BAP est basé sur le principe qui définit des intervalles pour chaque constituant donné. Après l'application de cette méthode, on a obtenu les résultats mentionnés dans le (*Tableau III.17*) :

Tableau III.17 : Composition du BAP pour 1m³ selon la méthode japonaise

Constituants	Masse (kg/m ³)
Ciment	430
Fillers calcaire	43
Sable	820,70
Gravier (3/8)	475,21
Gravier (8/15)	475,21
Eau	173
Superplastifiant	9,46

VI.1 La méthode de mortier de béton équivalent (MBE)

Il existe une corrélation simple reliant les propriétés rhéologiques d'un béton au mortier qui le compose. Ce dernier est obtenu par tamisage du béton frais au tamis de 5 mm. La pâte et les grains de sable adhérant aux gravillons et ne passant pas au tamis ne sont pas pris en compte.

La suite de la démarche consiste à définir les essais de caractérisation du mortier tamisé et de définir une méthode permettant de formuler directement le MBE sans avoir recours au tamisage. Il s'agissait de formuler directement le MBE à partir de la composition de béton initiale. Pour cela, nous conservons les mêmes constituants et dosages que dans le béton, excepté les gravillons qu'il est indispensable de retirer. La composition du MBE peut être déduite de celle du béton de la manière suivante :

- même rapport E/C
- mêmes natures et dosages en additions minérales avec une utilisation du sable du béton
- mêmes nature et dosage en adjuvant et même mode d'introduction
- ajout d'une quantité de sable reproduisant la même surface granulaire que les gravillons retirés.

La composition du mortier autoplaçant témoin a été ensuite déterminée en utilisant la méthode de mortier du béton équivalent établie par Schwartzentruber (91). En appliquant cette méthode, on a obtenu les dosages des constituants exposés dans le (Tableau III.18).

Tableau III.18 : Composition de MAP (0%) pour 1 m³ selon la méthode MBE

Mortier témoin MAP*	
Ciment (Kg/m ³)	664
fillers (Kg/m ³)	66
Sable (Kg/m ³)	1372
Eau (Kg/m ³)	276
Superplastifiant (Kg/m ³)	10,6
Fine/Ciment	0,10
E/L (Eau/Liant)	0,38

VI.2 Protocole de mélange des mortiers autoplaçants (MAP)

Le protocole de mélange des mortiers autoplaçants (MAP) a été établi selon les caractéristiques recherchées (la fluidité du mortier selon le béton autoplaçant). Ce protocole a été appliqué sur tous les mélanges des mortiers étudiés durant notre étude.

Ce protocole est le suivant :

- Mettre de l'eau et 2/3 de superplastifiant dans un récipient
- Ajouter le mélange liant (ciment + fines)
- Mélanger à vitesse lente pendant 1 min 30 sec ensuite, racler le bord et mélanger encore 1min 30 sec
- Verser la moitié du tiers de superplastifiant et la moitié de sable
- Mélanger à vitesse lente pendant 1 min
- Rajouter encore le reste du tiers du superplastifiant et l'autre moitié du sable
- Mélanger à vitesse lente pendant 1 min
- Enfin, mélanger à vitesse rapide pendant 1min (le temps totale est de 6 min).

VI.3 Conduite d'essai

VI.3.1 A l'état frais

Etant donné que notre étude est réalisée sur des mortiers autoplacants, il est nécessaire de vérifier les propriétés rhéologiques de ces mortiers. Ces derniers doivent être fluides, stables (ne présentant pas de phénomène de ségrégation) avec une bonne mise en œuvre (sans secousse et sans vibration). Pour cela, nous avons procédé à la caractérisation des mortiers autoplacants à l'état frais à savoir la fluidité (test d'étalement) et la mise en œuvre.

La fluidité a été mesurée par le test de min-cône. Ce test consiste à mesurer le diamètre moyen de la galette après affaissement du mortier. Nous rappelons que les diamètres préconisés pour un MAP est de 600 mm (cône d'Abrams). Cette plage du diamètre peut nous donner des valeurs d'étalements pour un béton autoplacant qui sont comprises entre 650 et 750 mm.

VI.3.2 A l'état durci

Durant cette étude, des éprouvettes prismatiques (40x40x160 mm³) ont été utilisés pour tous les échantillons étudiés. Un jour après de la coulée, les éprouvettes ont été conservées à l'air libre à la température ambiante. Divers tests et mesures ont été effectuées afin d'étudier les propriétés physiques (masse volumique, absorption, porosité, et ultrasonique) et mécaniques (module d'élasticité dynamique, résistance à la traction par flexion et à la compression).

La porosité des mortiers autoplacants a été déterminée en utilisant la relation suivante :

- $V_{\text{vide}} = M_a - M_s$
- P : la porosité d'éprouvette en pourcentage
- M_a : la masse d'éprouvette après l'immersion dans l'eau pendant 28 jours (g)
- M_s : la masse sèche de l'éprouvette (g)

L'absorption de l'eau a été calculée à l'aide de l'équation suivante :

Avec :

- Ab : absorption de l'éprouvette en (%)
- Ma : la masse de l'éprouvette après l'immersion dans l'eau pendant 28 jours (g)
- Ms : la masse sèche de l'éprouvette (g)

Le contrôle non destructif par ultrason a été réalisé en utilisant la méthode directe qui consiste à appliquer les transducteurs (émetteur et récepteur) sur les deux faces de l'élément à mesurer. On utilise un produit couplant entre la sonde et l'élément pour améliorer le contact.

Le module d'élasticité dynamique a été déterminé par la méthode acoustique (test ultrasonique) sur des éprouvettes des mortiers autoplacants à l'âge de 28 jours. Après la détermination de la vitesse de propagation du son à travers l'éprouvette, on calcule le module d'élasticité dynamique en utilisant la formule suivante :

$$E_d = \rho \cdot V^2$$

Ou :

- E_d : Le module élastique dynamique en (GPa)
- ρ : La masse volumique de l'éprouvette en (kg/m³)
- V : La vitesse du son en (m/s)

V. RESULTATS ET INTERPRETATIONS

V.1 Caractérisation de mortier à l'état frais

V.1.1 La fluidité des mortiers (l'essai d'étalement)

Les propriétés générales d'un béton autoplacant frais sont la fluidité et l'homogénéité. Ces propriétés sont étudiées sur plusieurs aspects, et peuvent se diviser en trois critères mesurables par des tests empiriques: le remplissage, la résistance à la ségrégation, et la capacité à passer à travers les obstacles que nous appellerons capacité de passage.

Les échantillons étudiés ont été élaborés en substituant partiellement le sable naturel par la mousse de verre à des rapports volumiques (0, 30, 50, et 100 %). La fluidité a été mesurée en appliquant la méthode de min-cône (92). Ce test consiste à mesurer le diamètre moyen de la gaulette après affaissement du mortier (après soulèvement du cône). La tendance à la ségrégation peut être évaluée qualitativement. Les granulats grossiers devraient être répartis

uniformément et aucune concentration ou séparation des fines ne devrait apparaître sur les bords de la galette.

Les résultats ont montré que la fluidité diminue en fonction du taux de substitution du sable par la mousse de verre. En effet, plus le taux de substitution augmente plus l'étalement des mortiers diminue. Cela peut être expliqué par la grande porosité des granulats fins de mousse de verre, qui provoque l'absorption d'une quantité considérable de l'eau de gâchage. Il est à noter que le même constat a été obtenu par les auteurs (78), (79). Le comportement à l'état durci rapporte essentiellement des travaux concernant les performances mécaniques (résistance à la compression, résistance à la traction) et le retrait des bétons autoplaçants. Pour réaliser cette étude, des éprouvettes prismatiques (40x40x160 mm³) ont été utilisées.

Après 24 heures de la coulée, les éprouvettes ont été conservées à l'air libre et à température ambiante. Divers tests et mesures ont été effectuées afin d'étudier ces propriétés physiques et mécaniques.

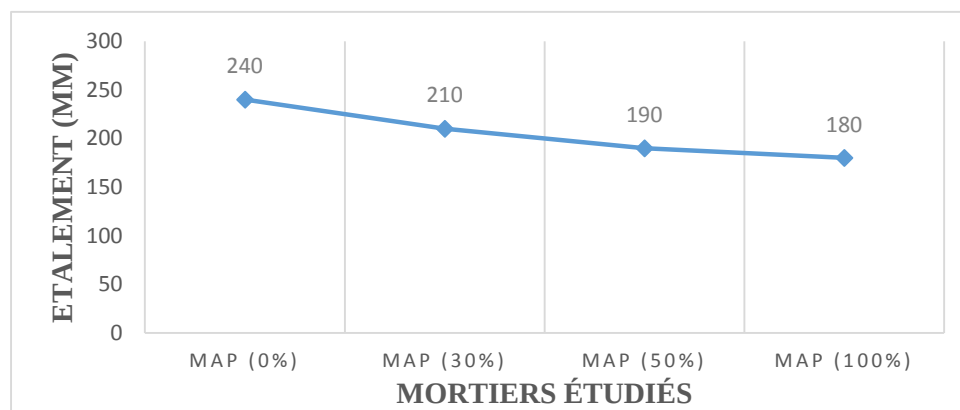


Figure III.2: Fluidité des mortiers autoplaçants en fonction du taux de substitution du sable par la mousse de verre

V.2 Caractérisation de mortier à l'état durci

Pour mieux comprendre l'effet de la substitution du sable naturel par les granulats fins de la mousse de verre sur les propriétés mécaniques des mortiers autoplaçants à l'état durci, nous avons procédé aux essais suivant :

V.2.1 Évolution de la masse volumique apparente

Les échantillons préparés pour la mesure de la masse volumique sont conservés à l'air libre et à température ambiante (93). D'après les résultats obtenus, nous remarquons que la masse volumique diminue en fonction du taux de substitution du sable par la mousse de verre.

Elle atteint une valeur minimale ($1,75 \text{ g/cm}^3$) lors d'un remplacement total du sable et le mortier devient plus ou moins léger. Ceci est expliqué par la densité plus élevée du sable comparée à celle des granulats légers.

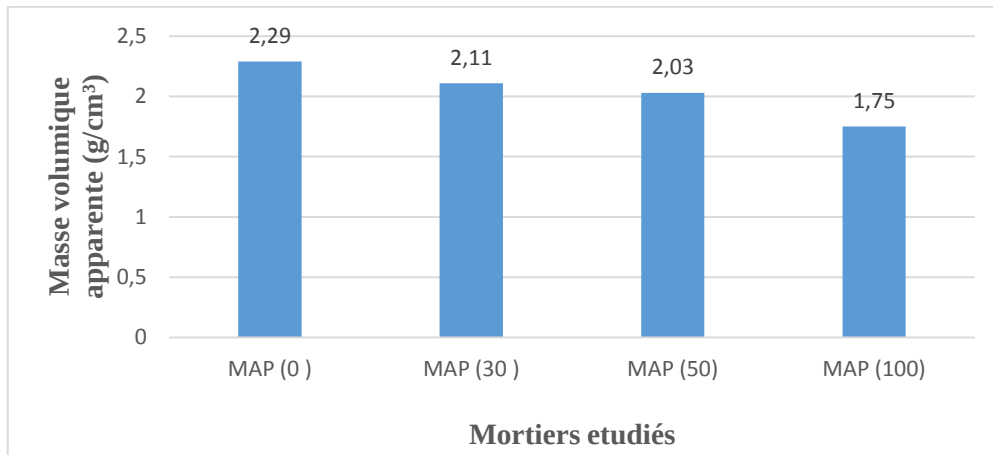


Figure III.3: Masse volumique apparente des MAP en fonction du taux de substitution du sable par la mousse de verre

V.2.2 La porosité et l'absorption de l'eau

La mesure de la porosité et l'absorption de l'eau a été faite après 28 jours de durcissement en utilisant des formules empiriques (93). D'après les résultats illustrés dans la (Figure III.4), une augmentation significative de la porosité est enregistrée (de 9,75 vers un maximum de 12,92 %). Cette augmentation peut être expliquée par la présence des pores vides (très élevée dans le mortier à substitution totale du sable) dans la surface des granulats de mousse de verre.

D'après la (Figure III.5), nous remarquons le même phénomène observé précédemment dans le cas de la porosité malgré que l'absorption de l'eau et la porosité accessible à l'eau sont des propriétés indépendantes. L'analyse de la porosité montre que la valeur la plus élevée est obtenue pour le mortier MAP (100%) (Substitution totale de sable). Il est connu que la porosité intergranulaire est un paramètre important à prendre en compte lors de la formulation d'un béton autoplaçant car elle a un effet remarquable sur la compacité du mortier, et par conséquent sur ses propriétés mécaniques.

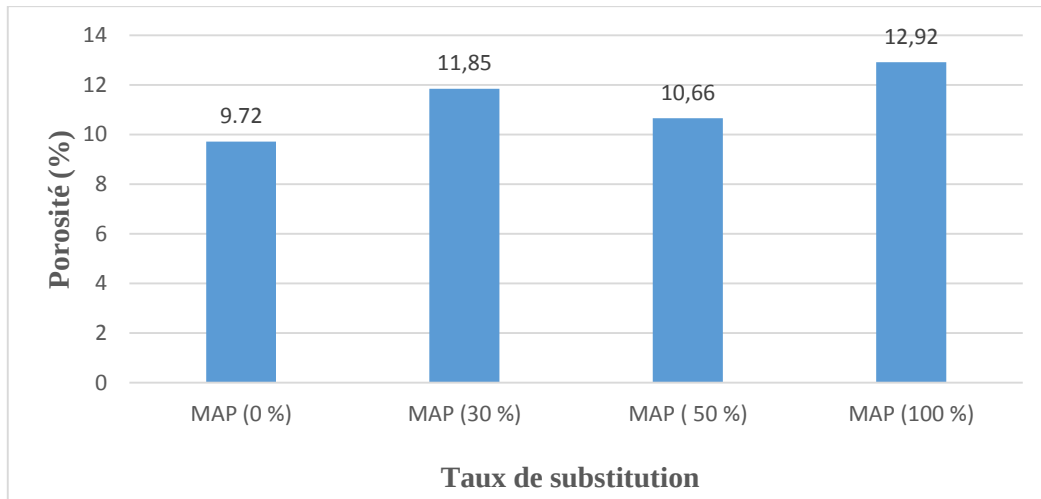


Figure III.4: Evolution de la porosité des mortiers autoplacants en fonction du taux de substitution du sable par la mousse de verre

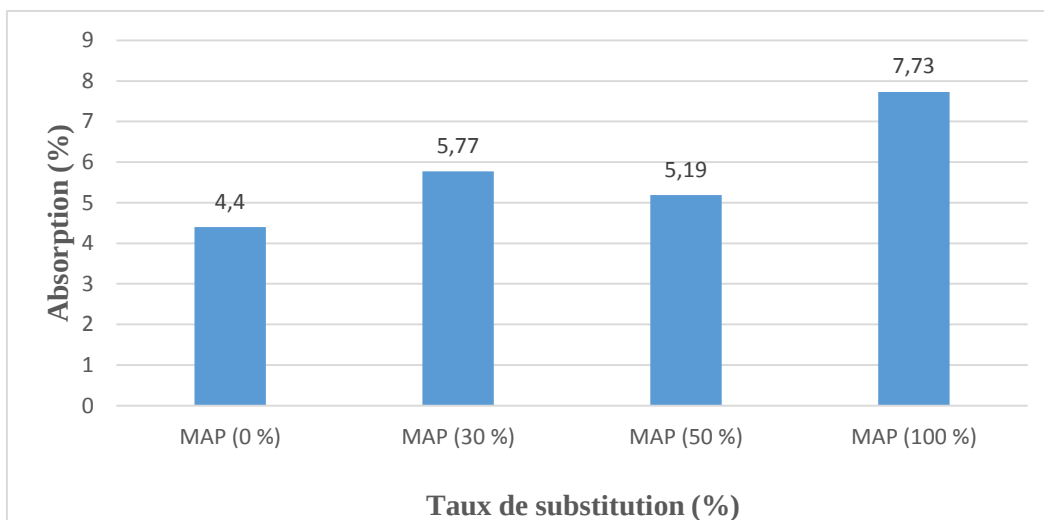


Figure III.5 : Evolution de l'absorption de l'eau en fonction du taux de substitution du sable

V.2.3 Contrôle non destructif par ultrason (ASTM C597-97; 1993)

La méthode directe consiste à appliquer directement les transducteurs sur les deux faces de l'élément à mesurer. Il est évident que plus le matériau est poreux, plus il devient plus léger et par conséquent il devient plus isolant phonique.

A cet effet, la (Figure III.6) montre clairement que la vitesse de propagation du son à l'intérieur du mortier diminue au fur et à mesure que le taux de substitution du sable par la mousse de verre augmente. Ce constat est prouvé par la porosité des mortiers qui a un effet retardateur de la vitesse de propagation du son, ce qui rend le mortier plus isolant et réduit la propagation du bruit à travers le matériau.

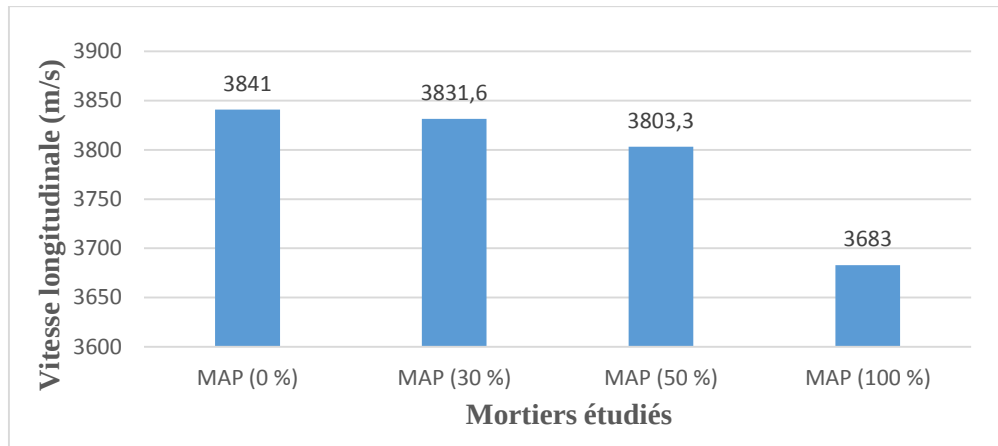


Figure III.6 : Histogramme de la vitesse de propagation longitudinale du son

V.2.4 La résistance à la flexion

Les bétons autoplaçants se caractérisent par un rapport E/C bas, ce qui amène à des bonnes résistances mécaniques alors que l'introduction d'un agent de viscosité peut diminuer la résistance mécanique aux jeunes âges (94). La (Figure III.7) montre que l'évolution de la résistance à la flexion diminue avec l'augmentation du taux de substitution du sable par la mousse de verre parce que le mortier devient plus poreux et moins compact (une mousse de verre de forte porosité). Ce constat a été confirmé également par plusieurs auteurs (78), (79).

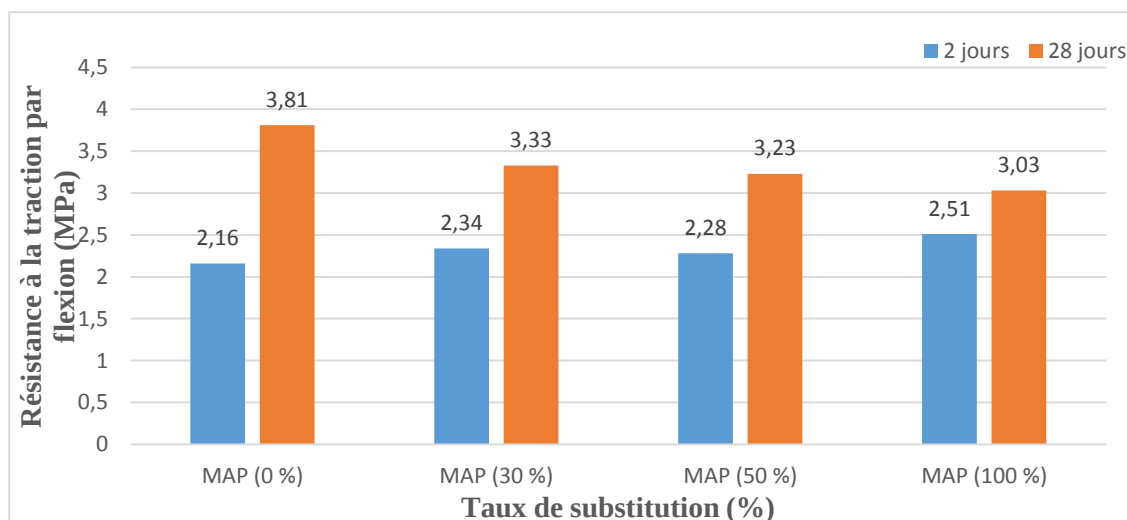


Figure III.7: Evolution de la résistance à la traction par flexion des MAP en fonction du taux de substitution du sable par la mousse de verre

V.2.5 La résistance à la compression

D'après la (Figure III.8), l'évolution de la résistance à la compression varie de la même manière que celle de la résistance de traction par flexion, elle atteint une valeur minimale de

38,35 MPa lors de la substitution totale du sable par les granulats de mousse de verre alors que sa valeur maximale est enregistrée dans le cas du mortier témoin non substitué (53,36 MPa). En effet, la résistance de compression augmente en fonction de l'âge de durcissement de tous les mortiers étudiés. Cela est expliqué par l'effet d'hydratation des minéraux du clinker.

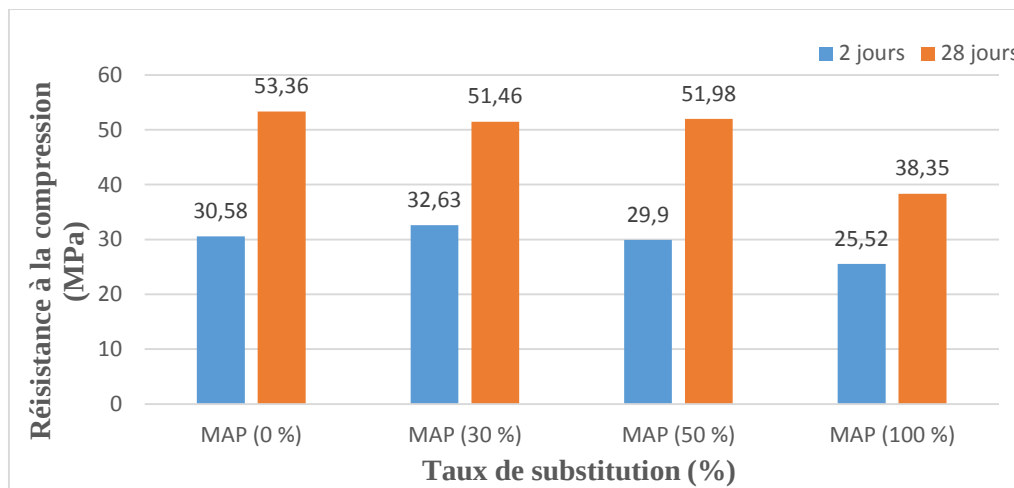


Figure III.8: Evolution de la résistance à la compression des MAP en fonction du taux de substitution du sable par la mousse de verre

V.2.6 Le module d'élasticité dynamique

Le module d'élasticité dynamique a été déterminé par la méthode acoustique (test ultrasonique) sur des éprouvettes des mortiers autoplacants étudiés à l'âge de 28 jours. Après la détermination de la vitesse de propagation du son à travers les éprouvettes, le module élastique dynamique est déterminé en utilisant la formule donnée par la norme (95).

D'après les résultats obtenus, le module d'élasticité dynamique suit la même tendance que celles de la résistance à la compression et la résistance à la traction par flexion. Il est à noter que la variation de ces caractéristiques mécaniques (E_d , R_c , R_f) est pratiquement identique. C'est-à-dire, lorsqu'on augmente le taux de substitution du sable par la mousse de verre, on remarque une diminution considérable de la résistance mécanique de tous les mortiers étudiés, y compris la résistance à la compression, la résistance à la traction et le module d'élasticité dynamique.

Tableau III.19 : Module élastique dynamique des mortiers étudiés

	MAP (0%)	MAP (30%)	MAP (50%)	MAP (100%)
E_d (GPa)	38,7	35,8	34,8	32,8

V.2.7 Étude de l'interface (granulats / matrice cimentaire)

Pour réaliser cette analyse, deux éprouvettes ont été choisies (le mortier de référence MAP (0%) et le mortier de substitution totale MAP (100 %)).

A l'échelle macroscopique, les granulats de mousse de verre ont une structure très dense.

A l'échelle microscopique, les granulats de mousse de verre ont une structure très poreuse (ces pores sont le résultat de dégagement du gaz de CO₂ contenu dans le calcaire ajouté à la composition de la poudre du calcin (à la température de 850 C°), ils présentent aussi une phase amorphe qui caractérise la mousse de verre.

La forme des grains ainsi que leur porosité ont favorisé l'adhérence avec la matrice cimentaire. En effet, comparativement au mortier témoin MAP (0 %), le mortier MAP (100%) présente une bonne adhérence entre les grains de mousse de verre et la matrice cimentaire

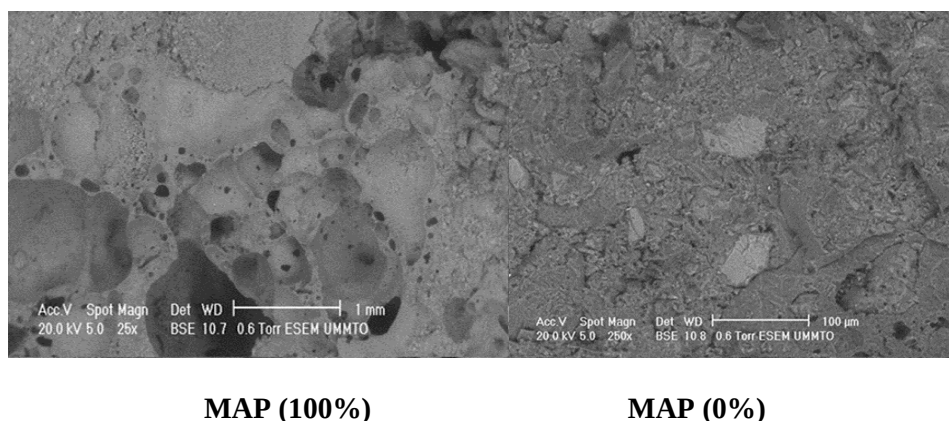


Figure III.9 : Images MEB des mortiers autoplacants de : a) référence et b) MAP (100%)

IV. CONCLUSION

Rappelons que l'objectif de cette partie du travail était la valorisation des déchets de l'industrie verrière, en particulier les déchets de verre à savoir le calcin, pour produire des granulats fins comme du sable dans la formulation des mortiers autoplacants. L'étude expérimentale a été menée pour évaluer les propriétés à l'état frais et à l'état durci des mortiers autoplacants, en substituant le sable par les granulats de verre mousse à des rapports de 0, 30, 50 et de 100 %. A l'issue des résultats obtenus dans cette étude, on peut conclure que :

- La substitution du sable par les granulats fins de mousse de verre a légèrement diminué la fluidité des mortiers autoplacants. Cependant, la fluidité enregistrée pour les mortiers contenant 100 % de mousse de verre, est de l'ordre de 180 mm. C'est une fluidité qui peut être corrigée par addition d'une petite dose du superplastifiant.

- La substitution du sable par la mousse de verre a conduit aussi à une diminution de la densité en vrac de tous les mélanges des mortiers autoplacants. Jusqu'à 100 % du remplacement du sable par la mousse de verre, la densité en vrac des mortiers est de l'ordre de 1,75 g/cm³.
- La résistance à la traction par flexion des mortiers autoplacants étudiés a légèrement diminué avec l'augmentation du taux de substitution du sable. Du fait que le mortier devient plus poreux avec les granulats de mousse de verre (de forte porosité), il est évident que la résistance a diminuée.
- Une réduction de la résistance à la compression des mortiers autoplacants étudiés par rapport au mortier de référence est observée quand le pourcentage de remplacement de sable par les granulats de mousse de verre est total (100%). Cette réduction est de l'ordre de 28 % pour les mortiers à 100 % en la mousse de verre.
- La valeur du module d'élasticité dynamique est de l'ordre de 33 GPa pour les mortiers à 100 % des granulats de mousse de verre.
- L'étude microscopique de l'interface granulats/matrice cimentaire des éprouvettes de mortiers par microscopie électronique à balayage MEB, nous a permis de conclure que la forme des grains de mousse de verre ainsi que leur porosité a joué un rôle important dans l'adhérence des grains avec la matrice cimentaire. En effet, comparativement au mortier MAP (0 %), le mortier MAP (100 %) présente à l'interface une bonne adhérence avec la matrice cimentaire.

Chapitre 4 : Recyclage des coquilles de mer dans les bétons autoplaçants

Le but de ce chapitre est d'étudier les propriétés rhéologiques et physico-mécaniques d'un béton autoplaçant élaboré à partir de coquillages comme complément cimentaire (remplacement total des charges de calcaires) et agrégat fin (substitution partielle et totale du sable). Avec des coquilles concassées (un agrégat fin) et des coquillages finement écrasés (une poudre fine), des bétons seront préparés à l'aide de ces deux produits. Des essais de caractérisation rhéologique (fluidité, écoulement) et physico-mécanique (densité et résistance mécanique) seront effectués sur ces bétons. Les résultats obtenus seront comparés aux caractéristiques d'un béton autoplaçant témoin (charges de calcaire et agrégat fin).

I. INTRODUCTION

Aujourd'hui, le recyclage des déchets marins dans les bétons est considéré comme une solution appropriée pour leur élimination car les facteurs économiques et environnementaux encouragent de plus en plus l'utilisation de ce type de déchets.

Des études antérieures ont été menées sur l'utilisation de coquillages dans les mortiers de ciment ou dans les bétons. Ces études ont confirmé leur potentiel d'être utilisés comme ajout, coquillages calcinés, ou agrégats, granulats grossiers, dans le béton.

Cependant, peu de travaux ont été menés pour étudier la substitution des additions minérales ou du sable par les coquillages de mer dans les bétons spéciaux tels que les bétons fluides. En 2015, un travail a été initié par Safi et al (96) sur l'utilisation de coquillages concassés comme agrégats fins par substitution partielle ou totale du sable. Cette étude a été réalisée sur des mortiers de ciment (mortiers autoplacants) (96).

Longtemps avant, Alan Elliott Richardson (97) a également étudié l'utilisation d'un produit de coquillages incorporé comme agrégat dans le béton ordinaire par un remplacement total (sable ou gravier). Toutes ces études ont montré que les bétons fabriqués avec des coquilles de mer ont des caractéristiques physiques et mécaniques acceptables pour une telle construction.

II. CARACTERISTIQUES ET IDENTIFICATION DES MATERIAUX UTILISES

II.1 Le ciment

Le ciment utilisé dans ce travail, est un ciment composé de type CEM II de classe de résistance 42,5. Il provient de la cimenterie de L'AFARJ. Les caractéristiques de ce ciment sont comme suit :

Tableau IV.1 : Caractéristiques physiques du ciment

Caractéristiques	Résultats	Norme
Consistance normal (%)	27,8	NF EN 196-3
Début de prise (min)	190	NF EN 196-3
Fin de prise (min)	265	NF EN 196-3
SSB (cm ² /g)	4410	NF EN 196-6
masse spécifique (g/cm ³)	2.99	NF EN 196-5
Retrait à 28 jours (µm/mm)	1000	NF EN 197-7

Tableau IV.2 : Résistance à la compression et la flexion du ciment selon la norme NF EN 196-1

Essais	âge (J)		
	2 jours	7 jours	28 jours
Résistance à la compression (MPa)	35,81	40,4	48,87
Résistance à la flexion (MPa)	4,41	6,37	8,35

Tableau IV.3 : Composition chimique du ciment par fluorescence X

CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO ₃	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	Chlorures	PAF	insoluble
60.4	20.71	5.45	3.63	2.37	0.23	0.65	2.15	0.007	4.28	-

Tableau IV.4 : Composition minéralogique du ciment par diffraction des rayons X

Eléments	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	CaO	gypse	Calcaire	Pouzzolane
%	58	18	05	13	01	05	05	07

II.2 Fillers de calcaire

C'est un calcaire issu du gisement d'EL-KHAROUB qui occupe la partie sud-ouest du massif Oum settas au nord-est de Constantine, il est d'origine biochimique, caractérisé par une grande pureté chimique et une blancheur élevée. Sa masse volumique absolue est de 2,68g/cm³ et sa finesse suivant la méthode Blaine est de 8379 (cm²/g).

Tableau IV.5: Analyse chimique du calcaire par fluorescence X

Eléments	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	P ₂ O ₅	TiO ₂	PAF
(%)	53,08	4,27	0,73	0,26	0,01	0,03	0,13	0,25	0,09	0,02	41,13

II.3 Sable

Le sable utilisé est un sable lavé concassé de Keddara, Wilaya de BOUMERDES. Après traitement du sable, les résultats des essais physiques et de l'analyse granulométrique obtenus sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau IV.6 : Caractéristiques physiques du sable (0/5)

Caractéristiques	Résultats
Masse volumique réelle	2,61 g/cm ³
Masse volumique imbibé	2,63 g/cm ³
Masse spécifique	2,72g /cm ³
Absorption	0,86 (%)
EVS	53,33 (%)
La teneur en bleu	0,7 (%)
Module de finesse	3,62

II.4 Superplastifiant

L'adjuvant utilisé est de type «MIDAFLOW30», c'est un superplastifiant haut réducteur d'eau à base de polycarboxylates qui améliorent considérablement les propriétés des bétons.

II.5 Eau de gâchage

L'eau utilisée pour le gâchage de béton est une eau potable du réseau publique de la ville de BOUMERDES.

II.6 Coquilles de mer

Le déchet des coquilles de mer utilisé dans notre travail, est un déchet de recyclage. Les coquilles ont une forme angulaire, comme nous montre la (*figure IV.1*) :



Figure IV.1 : Coquilles de mer utilisées dans cette étude

II.6.1 Caractéristiques des coquilles de mer

Les résultats des caractérisations physiques, de l'analyse chimique et de l'analyse granulométrique du déchet de coquille de mer utilisé dans le cadre de notre étude sont représentés dans les (*Tableaux IV.7*) et (*Tableau IV.8*) et la (*Figure IV.2*) respectivement.

Tableau IV.7 : Caractéristiques physiques du déchet de la coquille de mer

Caractéristiques	Résultats
Masse volumique réelle	2,76 g/cm ³
Masse volumique imbibé	2,78 g/cm ³
Masse spécifique	2,80 g/cm ³
Absorption	0,8 %
Module de finesse	4,93

Tableau IV.8 : Analyse chimique de la coquille par fluorescence X

Eléments	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	P ₂ O ₅	TiO ₂	PAF
(%)	54,54	0,32	0,26	0,02	0,14	0,64	0,01	0,01	0,02	0,01	44,04

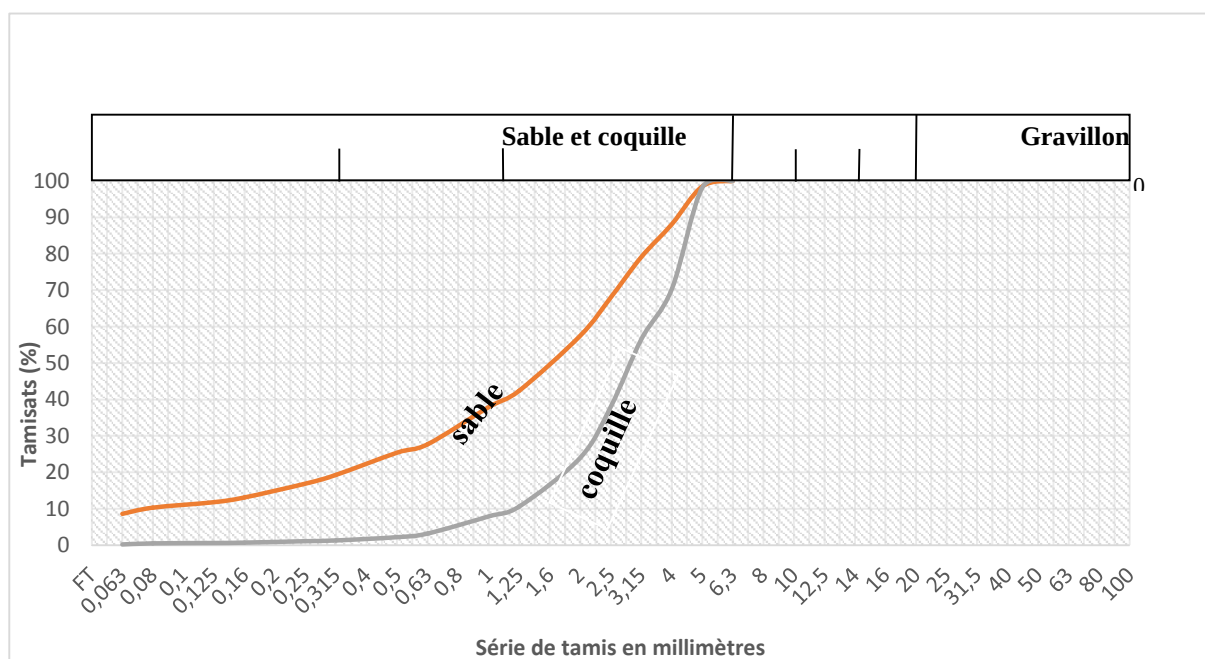


Figure IV.2 : Analyse granulométrique du sable et coquille 0/5

La (Figure IV.2) représente l'analyse granulométrique de sable et des coquilles de mer 0/5 par tamisage selon la norme NF EN 933-1 ENR. N° 0213/14. D'après cette figure, on constate que les deux matériaux, sable et coquilles, ont une finesse élevées ($M_f = 3,62$ pour le sable et $M_f = 4,93$ pour les coquilles de mer).

En effet, le sable présente un module de finesse faible par rapport aux coquilles de mer. Nous remarquons également que les coquilles ont une granulométrie serrée c.-à-d. les grains des coquilles ont presque les mêmes dimensions.

II.6.2 Etude microstructurale des coquilles de mer

Rappelons que notre étude est basée sur le remplacement partiel et total du sable par les coquilles de mer concassées. Une étude microstructurale s'avère être nécessaire afin d'acquérir plus d'informations sur ces coquilles avant de les utiliser. Cette étude est réalisée à l'aide des moyens d'investigations suivants :

- Analyse chimique par Fluorescence X
- Analyse thermique différentielle (ATD)
- Analyse thermique gravimétrique (ATG)
- Aspect macroscopique

II.6.3 Analyse chimique de coquille de mer et fillers de calcaire par fluorescence X

La (Figure IV.3) donne la composition chimique des coquilles de mer et des roches du calcaire utilisés dans cette étude. On remarque que les coquilles de mer contiennent les mêmes éléments chimiques sous forme d'oxydes que ceux du calcaire. Cela prouve les constats de la littérature. En outre, les coquilles de mer présentent un taux légèrement élevé du CaO que les fillers de calcaire concluant ainsi que ces dernières sont d'une nature calcaire.

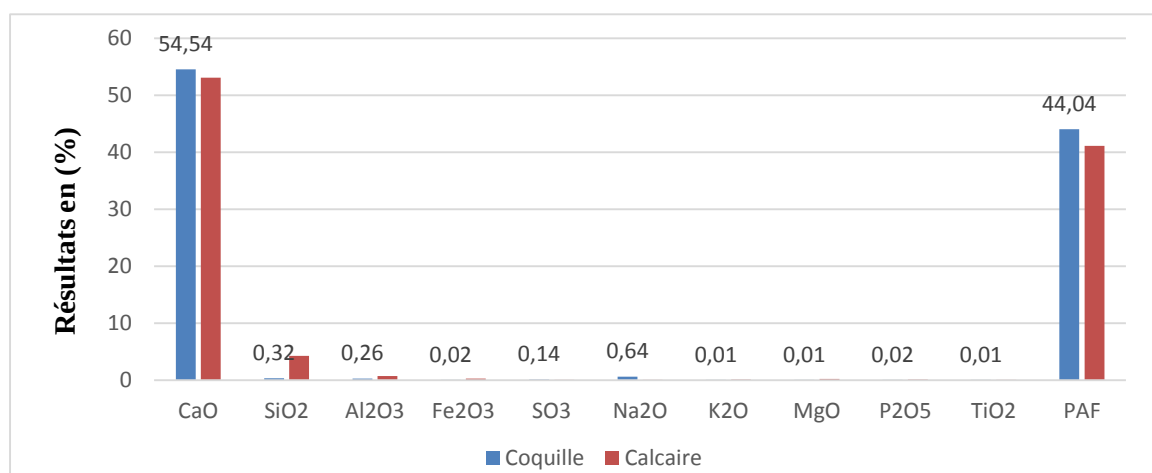


Figure IV.3 : Microstructure en différents types d'éléments

II.6.4 Analyse thermique ATD et ATG

La (Figure IV.4) présente l'analyse thermodifférentielle (ATD) et thermogravimétrique (ATG) des coquilles de mer. L'analyse thermogravimétrique (ATG), présente l'évolution de la masse d'un échantillon chauffé de 20 à 1000 °C. Pour l'analyse thermodifférentielle, on observe 2 pics endothermiques (147,1- 842,5°C). Le premier pic est attribué au départ de l'eau libre et le deuxième pic est attribué à la décarbonatation et à la libération du CO₂.

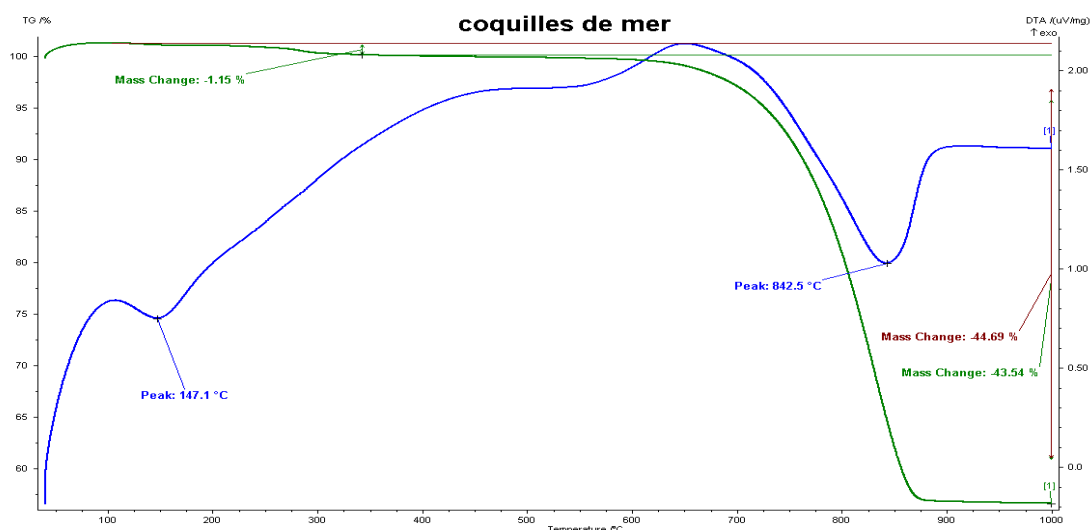


Figure IV.4: Analyses ATD-ATG des coquilles de mer.

D'après l'analyse thermogravimétrique, on observe une perte de masse due à la décomposition de $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$, et la formation de la Basanite à 325 °C. Cette perte est due aussi à la décomposition des CaCO_3 et à la formation de la calcite à partir de 800 à 1000 °C. La perte au feu est élevée 44,69 %.

II.6.5 Préparation des coquilles de mer

Les coquillages utilisés ont été récupérés, nettoyés et séchés à l'air libre et dans un four de séchage (à 105 °C). Après écrasement des coquillages dans un concasseur à mâchoires, ceux-ci ont été tamisés sur un tamis de 5 mm. Les étapes de préparation des coquillages écrasés sont illustrées dans la (Figure IV.5) alors que la (Figure IV.6) représente la distribution granulométrique des coquillages écrasés et du sable naturel.



Figure IV.5: Étapes de préparation des coquillages écrasés

III. FORMULATION DES BETONS AUTOPLACANTS

En utilisant la méthode japonaise, six formulations de béton autoplaçant ont été obtenues avec différentes procédures de substitution des charges calcaires et du sable par les coquillages (BAP1- BAP6). Le (Tableau IV.9) donne la composition du béton témoin BAP1 et les bétons autoplaçants étudiées. Le rapport eau-liant utilisé est constant ($E/L = 0,38$) et le superplastifiant est également constant.

Tableau IV.9: Composition des bétons étudiés (Kg/m³)

Les composants	BAP1	BAP2	BAP3	BAP4	BAP5	BAP6
Ciment	430	430	430	430	430	430
Fillers calcaire	43	-	43	-	43	-
Coquillages finement écrasés *	-	43	-	43	-	43
Agrégats fins	934	934	467	467	-	-
Coquillages écrasés **	-	-	467	467	934	934
Agrégats grossiers	845	845	845	845	845	845
Eau	180	180	180	180	180	180
Superplastifiant	7,10	7,10	7,10	7,10	7,10	7,10

*: Coquillages finement écrasés utilisés comme addition

**: Coquillages écrasés utilisés comme agrégats fins

VI. METHODES D'ESSAI

Pour réaliser ce travail, des échantillons prismatiques (70x70x280mm³) et cylindriques (160x320mm³) ont été fabriqués pour chaque mélange (Figure IV-6). Un jour après la coulée, les échantillons de béton ont été stockés dans l'eau sous 21 ± 1 °C. Différents tests et mesures ont été effectués pour déterminer les propriétés du béton à l'état frais et à l'état durci (essai d'écoulement, la densité apparente, la résistance à la flexion, la résistance à la compression uniaxiale et le module élastique dynamique).

La fluidité a été évaluée par le test d'écoulement à l'aide du cône d'Abrams utilisé pour les bétons. Pour les essais mécaniques, le test de flexion (à trois points) et la compression uniaxiale sont effectués à 7 et 28 jours sur des échantillons de béton. Des essais de flexion en trois points ont été réalisés sur des échantillons prismatiques (70x70x280 mm³) selon la norme ASTM C348 (98).

De même, des échantillons cylindriques (160x320mm³) de chaque mélange ont été soumis à une compression uniaxiale, selon la norme ASTM C349 (99). Le module d'élasticité dynamique pour tous les bétons a été déterminé par la méthode acoustique en utilisant le test de la vitesse d'impulsion ultrasonique (test de l'UPV - ASTM C597-97) à 28 jours (95).



Figure IV.6 : Essai d'écoulement des échantillons de béton

Après la détermination de la vitesse de propagation du son à travers l'échantillon, le module élastique dynamique est calculé en utilisant la formule suivante:

$$E_d = \rho \cdot V^2$$

Ed: Module d'élasticité dynamique (GPa)

ρ : Densité de l'échantillon (Kg/m³)

V: Vitesse du son (m/s).

V. RESULTATS ET INTERPRETATIONS

V.1 Propriétés à l'état frais

V.1.1 La fluidité des BAP

La (Figure IV.7) représente l'évolution de la fluidité des bétons autoplacants étudiés. On remarque que le débit est pratiquement le même pour tous les mélanges des bétons étudiés, ce qui est une fluidité acceptable pour un BAP. Cependant, le BAP5 a une fluidité plus au moins faible par rapport aux autres mélanges. Ceci est expliqué par le fait que les coquilles de mer utilisées (comme un sable) a légèrement réduit la fluidité parce qu'ils ont une forme d'aiguilles qui gêne le flux de béton. Ces résultats ont été prouvés par Safi al. (96)

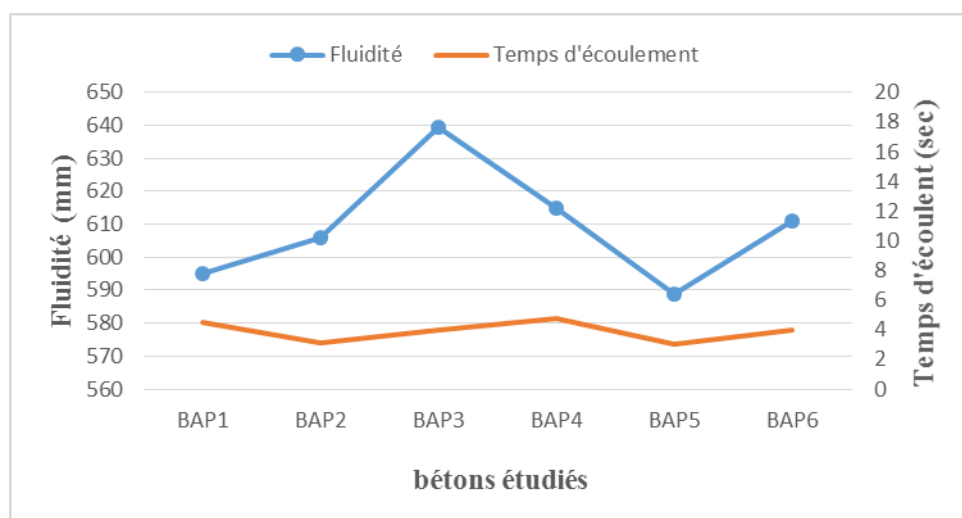


Figure IV.7 : Fluidité et temps d'écoulement des bétons étudiés

V.1.2 Le flux de béton

Plus la fluidité du béton est grande, plus le temps d'écoulement de ce dernier sera réduit. La mise en œuvre de tous les bétons développés a été estimée par le temps d'écoulement illustré dans la (Figure IV.7). On remarque que le flux de béton est bon (figure IV.8) et que sa mise en œuvre est acceptable pour un béton autoplacant. En effet, le temps d'écoulement enregistré pour tous les mélanges est presque le même; Il est d'environ 4 ± 1 sec.



Figure IV.8 : Essai d'écoulement et la mise en œuvre du béton

V.2 Les propriétés à l'état durci

V.2.1 La densité apparente

La (Figure IV.9) illustre la densité apparente des bétons étudiés en fonction de l'âge de durcissement mesuré à 28 jours. Il a été noté que la densité du béton a augmenté en fonction du taux de substitution du calcaire par les coquillages finement concassés et également en fonction de la substitution du sable naturel par les coquilles de mer écrasées. Il convient de noter que la densité spécifique des coquillages est plus proche de celle des charges calcaires ($2,71 \text{ g/cm}^3$) et supérieure à celle du sable ($2,61 \text{ g/cm}^3$).

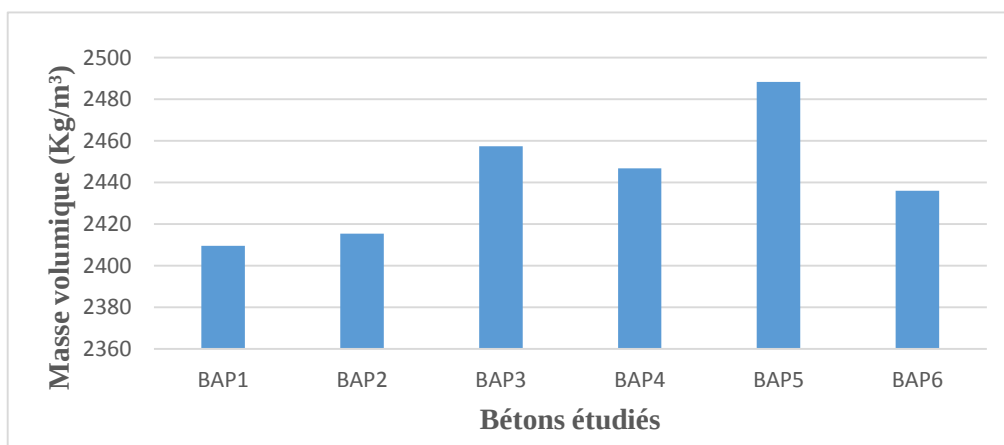


Figure IV.9 : Evolution de la masse volumique mesurée à 28 jours

V.2.2 La résistance à la flexion et la résistance à la compression

Les résultats des essais mécaniques sur les bétons étudiés sont donnés dans les (Figure IV.10 (a)) et (Figure IV.10 (b)). Ces figures illustrent l'évolution de la résistance à la flexion et la résistance à la compression du béton autoplaçant selon le taux d'incorporation des coquillages. Il est à remarquer que la résistance à la compression et la résistance à la flexion restent constantes pour tous les mélanges de béton au fur et à mesure que l'âge de durcissement augmente. En outre, les valeurs de la résistance à la compression étaient quasiment identiques quel que soit le mode d'utilisation des coquillages dans le béton (sous forme de poudre fine ou d'agréments fins). Cependant, par rapport au BAP1, une légère augmentation de la résistance des bétons BAP2 et BAP5 a été enregistrée (voir (Figure IV.10 (b))). Lors d'une utilisation totale de coquillages, on a eu un béton ayant une résistance de 43 MPa qui est identique au béton de contrôle. Cela signifie que les coquillages peuvent être utilisés dans le béton autoplaçant sans perturber les performances mécaniques.

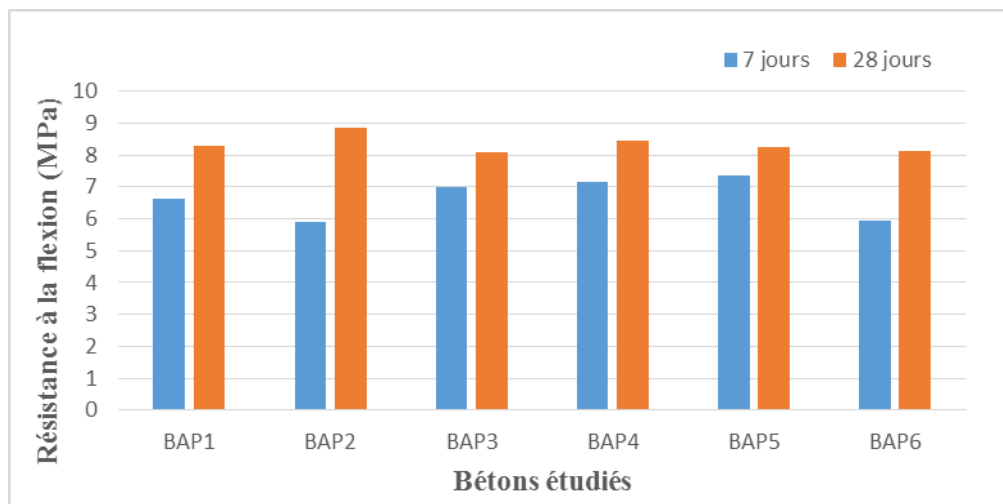


Figure IV.10-a : Evolution de la résistance à la flexion mesurée à 7 et à 28 jours

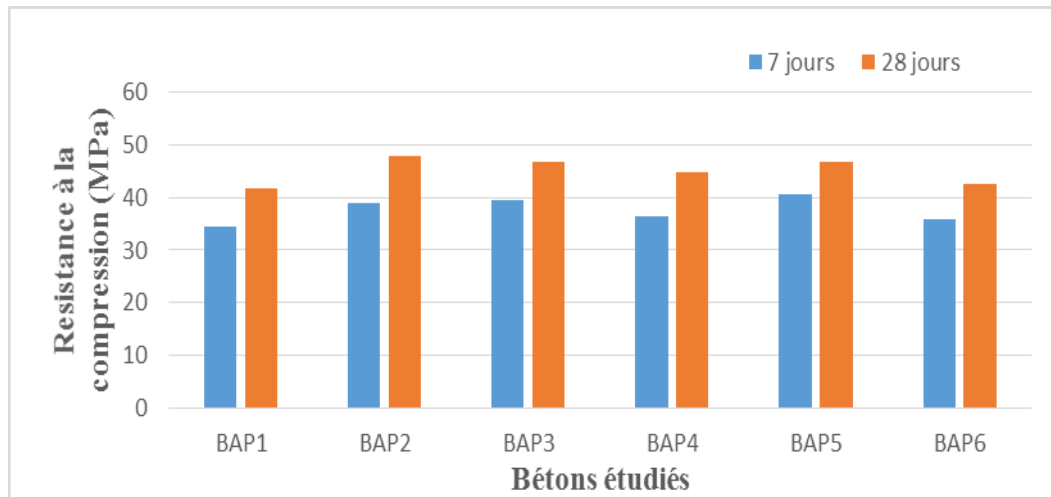


Figure IV.10-b : Evolution de la résistance à la compression mesurée à 7 et à 28 jours

V.2.3 Le module d'élasticité dynamique

Selon les résultats obtenus, on peut observer que les bétons BAP4, BAP5 et BAP6 ont des valeurs de module dynamique élastique supérieures par rapport au béton de référence (BAP1). La substitution des charges de calcaire par les coquillages finement écrasés (comme ajout) ainsi que la substitution du sable par des coquillages écrasés (en tant que granulats fins) a grandement amélioré la compacité du béton et a provoqué une légère augmentation du module dynamique d'élasticité.

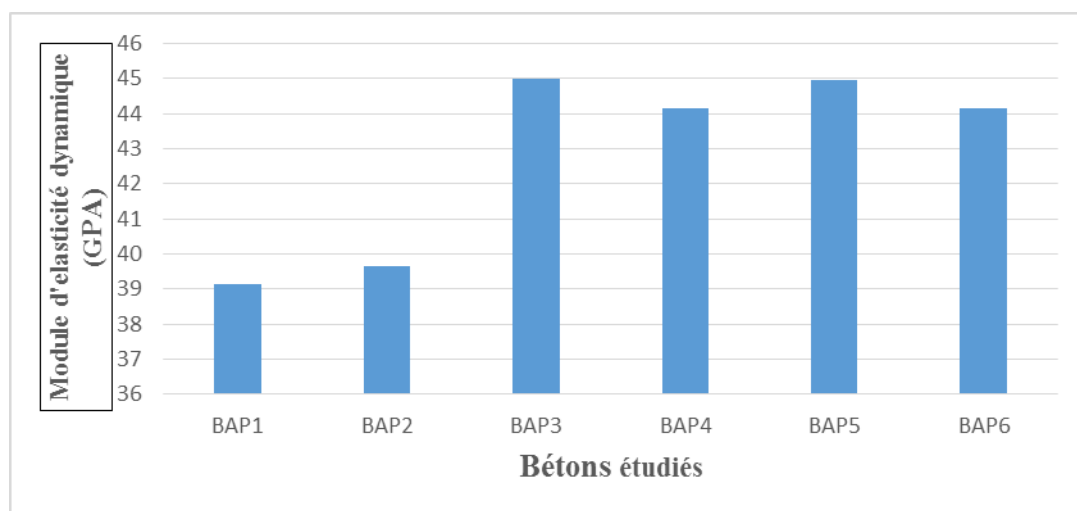


Figure IV.11 : Module élastique dynamique (E_d) mesuré à 28 jours

V.2.4 Aspect macroscopique des bétons étudiés

Selon la (Figure IV.12), il est clair que la forme granulaire des coquilles a favorisé la distribution de ce dernier dans le béton. Les bétons BAP1 et BAP2 ont pratiquement la même structure macroscopique.

Cela peut être expliqué par le fait que la poudre de calcaire et la poudre de coquillage sont presque identiques, donc ces deux poudres ont joué le même rôle de remplissage des vides (100). De même, BAP3 et BAP4 ont la même structure macroscopique dans le cas où le sable est partiellement substitué par les coquillages écrasés. Cependant, pour une substitution totale des charges de calcaire et du sable par les coquillages (poudre ou écrasés), on a remarqué une amélioration significative de la distribution des grains dans la matrice cimentaire. En effet, la forme angulaire des coquillages a un effet positif pour obtenir une bonne compacité du béton.

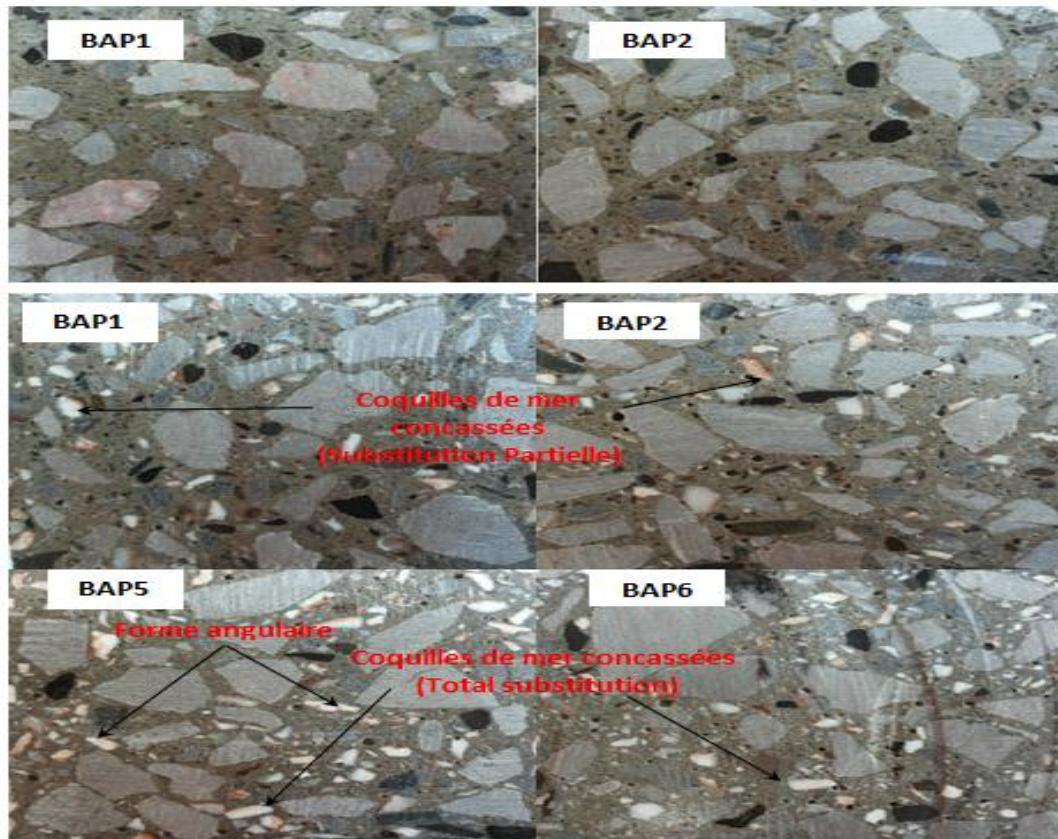


Figure IV.12: Images prises sur des échantillons de béton à 28 jours

IV. CONCLUSION

Cette partie de travail de thèse avait pour but d'estimer le potentiel d'utilisation des coquillages dans les bétons autoplacants. Les coquillages sont utilisés comme matériaux cimentaires par substitution de charges calcaires et comme agrégats fins par substitution de sable. Quel que soit le mode d'utilisation des coquillages dans un béton autoplacant, on peut avoir un béton ayant une résistance de 43 MPa qui est utilisé pour la construction. En effet, les résultats obtenus ont montré que les coquillages peuvent être utilisés dans le béton autoplacant sans perturber les performances mécaniques de ce dernier. En outre, la poudre de coquillage a joué le même rôle de remplissage des vides que celles des charges de calcaire. Cependant, pour

une substitution totale des charges de calcaire et du sable par les coquillages (poudre ou écrasés), une amélioration significative de la distribution des grains dans la matrice de ciment a été observée. En conséquence, la forme angulaire du coquillage a un effet positif, conduisant à l'obtention d'une bonne compacité du béton.

Chapitre 5 : Recyclage et valorisation des déchets de brique réfractaire dans les bétons spéciaux

Le but principal de cette partie de notre étude est d'évaluer le recyclage des déchets de briques réfractaires (DBR) en tant que matériaux cimentaires supplémentaires, par un remplacement total de la fumée de silice, pour produire un nouveau béton dit béton fibré ultra-haute performance (BFUHP). Ce travail présente une étude expérimentale sur la formulation et la caractérisation physico-mécaniques des bétons fibrés ultra-hautes performances, basée sur l'utilisation des déchets de briques réfractaires et du sable des dunes finement broyé en tant qu'ajout fin. Les briques réfractaires ont été récupérées de l'industrie du verre flotté (Mediterranean Float Glass) après leur utilisation dans le bassin du four. Trois compositions de béton (BFUHP) ont été établies sur la base de 4 types de mélange : le BFUHP témoin (BT) à base de fumée de silice et le BFUHP à base de différents dosages des poudres fines (SDB, BRB et Mix). La performance des BFUHP étudiés, a été évaluée en déterminant les caractéristiques essentielles du béton à l'état frais et à l'état durci.

I. INTRODUCTION

De plus en plus, les déchets industriels trouvent leur place en tant que matériaux cimentaires supplémentaires dans la fabrication des bétons ou mortiers de ciment. Parmi ces déchets, la fumée de silice, les laitiers de haut fourneau, les cendres volantes ... etc. **(101), (102)**. Ces déchets peuvent être incorporés dans le béton comme des additions minérales ou granulat fin (sable), afin d'améliorer certaines propriétés à l'état frais tels que la fluidité ou à l'état durci telle que la durabilité.

D'autre part, les progrès technologiques dans le domaine des matériaux de construction ont permis d'élaborer de nouveaux bétons dits bétons fibrés ultra-hautes performances (BFUHP), qui nécessitent un dosage très élevé du ciment pour obtenir des bétons ayant d'importante résistance à la compression et de bonne rigidité **(27), (46)**.

Toutefois, les recherches menées à ce jour sont peu nombreuses et n'ont pas évalué la performance et la durabilité du béton dont il est une question clé. Vu que les études sur le béton contenant des déchets de céramique ou de briques réfractaires sont limitées, la recherche dans ce domaine doit être plus approfondie pour évaluer ses performances. D'autre part, la production d'une tonne de ciment produit 0,55 tonnes de CO₂ et nécessite 0,39 tonnes supplémentaires de CO₂ des émissions de carburant **(103)**.

Par conséquent, le remplacement de ciment dans le béton par les déchets en céramique finement broyé conduit à d'énormes économies d'énergie et fournit des avantages environnementaux importants. En outre, il aura également un effet majeur sur la réduction des coûts de fabrication du béton, car le coût du ciment représente plus de 45% du coût du matériau béton. En plus, plusieurs auteurs ont déjà confirmé que les poudres de déchets céramiques ont une réactivité pouzzolanique **(104), (105)**.

Dans la pratique, la formulation des bétons fibrés ultra-hautes performances (BFUHP) nécessite des composants adéquats et des paramètres de compositions bien maîtrisées telles que le rapport (E/C), le mélange de liants (ciment et additions minéraux), etc. Cette dernière doit être supérieure avec un minimum d'eau (E/C inférieur), afin d'obtenir les meilleures performances mécaniques. Pour cette raison, les chercheurs continuent de trouver d'autres ajouts pour remplacer totalement la fumée de silice dans la formulation des BFULHP pour les rendre moins coûteuses.

Des études fondamentales sur les propriétés mécaniques et l'analyse du comportement BFULHP ont été atteints graduellement au cours de la dernière décennie par les recherches **(27)**

(106). Ainsi, une étude très détaillée a été faite par Taфраoui et al sur l'évaluation du sable de dunes dans la formulation du BHP (107). Les résultats ont montré que ce dernier peut avoir un caractère cimentaire pour la formulation du béton.

A cet effet, le but de cette étude est d'évaluer le potentiel des déchets de briques réfractaires comme matériaux cimentaires supplémentaires, par substitution totale de la fumée de silice, pour produire un béton ultra-haut performance (BFUHP).

Ce chapitre présente une étude expérimentale sur la formulation et la caractérisation physico-mécaniques des bétons fibrés ultra-haute performance basée sur les déchets de briques réfractaires et le sable des dunes finement broyée comme ajout fin. Le rapport (E/C) et la quantité du superplastifiant sont maintenues constants. Pour cela, la méthodologie du travail suivit pour réaliser notre étude est la suivante.

- Caractérisation des matériaux utilisés : (Ciment CEM I, Sable de dunes, (SDB et BRB)
- Formulation des bétons (BFUHP) étudiés, à savoir les variantes des BFUHP à base de différents dosages.
 1. BFUHP (BT) à base de fumée de silice
 2. BFUHP à base de différents dosages des poudres fines (SDB, BRB et Mix)
- Des essais physiques et mécaniques seront réalisés sur les bétons formulés.
 - A l'état frais
 - A l'état durcis
- Interprétations des résultats des essais effectués.
- Conclure ce chapitre.

II. CARACTERISTIQUES ET IDENTIFICATION DES MATERIAUX UTILISES

D'abord, on veut déterminer les caractéristiques des différents constituants entrant dans la composition du béton car la connaissance de leurs propriétés est impérative à toute recherche ou étude d'investigation, puisque chacune d'entre eux pourrait influencer considérablement sur les résultats d'étude. Pour cela, on a procédé à la caractérisation des matériaux suivants :

II.1 Le ciment

Il s'agit d'un ciment sans ajouts CEMI (CPA), qui est obtenue par broyage du clinker avec 5 % de gypse pendant 50 minutes.

II.1.1 Caractéristiques physiques

Connaissant bien le rôle important que présente le ciment dans la composition du béton, des analyses physiques seront effectuées dans les conditions générales des essais :

- La température de la salle de travail est de $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, l'humidité relative est de 65% et la pression atmosphérique est normale.
- L'eau utilisée (eau du robinet) contient peu de sulfate et dont la température est de $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$.

Ces analyses consistent à déterminer selon les normes en vigueur, le temps de prise, la stabilité et la consistance normale du ciment utilisé.

Tableau V.1 : Caractéristiques physique du ciment

Caractéristiques physique	Valeurs	norme
Consistance normale (%)	27	NF EN196-03
Poids spécifique (g/cm^3)	2,71	/
Surface spécifique de BLAINE (SSB) (cm^2/g)	4731	NF EN 196-6
Début et fin de prise	Début de prise	2 h : 40 min
	Fin de prise	4 h : 50 min

Le CEM I a une consistance normale élevée, cela peut s'expliquer par sa surface spécifique élevée qui contribue à une légère augmentation de la consistance normale, ceci est dû au fait que la surface de mouillage du ciment augmente au fur et à mesure que le ciment est finement broyé.

Il est connu que le C_3A réagit rapidement avec l'eau et libère une très grande quantité de chaleur durant les premiers jours de durcissement, donc il est responsable des résistances du ciment à jeune âge, mais à l'âge de 7j et 28j les résistances de CEM I augmente, étant donné que le CEM I est un ciment sans ajout.

Le temps de début de prise est favorisés par :

- La surface spécifique du ciment (CEM I) : plus le broyage est poussé, plus le temps de prise est court.

- La proportion élevée de C_3A dans (CEM I),

II.1.2 Caractéristiques chimique et minéralogiques

L'essai chimique est réalisé suivant les modalités de la norme NF EN 196-4.

Tableau V.2 : Composition chimique de CEM I

Oxyde	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	Fe ₂ O ₃	P ₂ O ₅	Perte au feu
Teneur	21.75	5.75	62.09	1.19	1.01	0.29	2.62	3.51	0.20	1.38

L'essai minéralogique est réalisé suivant les modalités de la norme NF EN 196-4.

Tableau V.3 : Composition minéralogique de CEMI

Ciments	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	CaO L
CEM I	60.39	16.01	5.15	12.4	1.16

II.1.3 Caractéristiques mécaniques

Les essais sont réalisés suivant les modalités de la norme NF EN 196-1 sur des éprouvettes prismatiques 40 X40X160 mm³.

Tableau V.4: Résistances à la compression et à la flexion de CEMI

	Résistance à la Compression (MPa)			Résistance à la flexion (MPa)		
	2j	7j	28j	2j	7j	28j
CEM I	20,99	39,73	51,75	4,127	7,554	9,143

D'après les résultats présentés dans le tableau ci-dessus, on remarque que l'évolution des résistances dans le temps est différente de sorte que :

- A 2 jours : Le CEM I donne de meilleure résistance, grâce à leur composition riche en aluminates de calcium qui forment les premiers cristaux hydratés responsables du durcissement initial et des premières résistances, par formation de l'ettringite.
- A 7 jours : Les silicates de calcium hydratés de C_3S constituent la vraie structure du ciment durci et donnent des résistances à jeune âge, sur cette base on peut expliquer l'évolution de la résistance à 7 jours pour le CEMI.

- A 28 jours, le C_2S et C_3S contribuent aux résistances à moyen et à long terme, le CEMI a de bonnes résistances.

II.2 Le sable de dune

Il est utilisé comme matériau cimentaire dans le béton de référence. Le (Tableau V.5) résume les résultats de l'analyse physique du sable de Boussaâda.

Tableau V.5 : Caractéristiques physiques du sable de Boussaâda.

Caractéristique	Résultats
Masse volumique apparente (g/cm^3)	1,478
Masse volumique absolue (g/cm^3)	2,608
ESV (%)	84,47
ESP (%)	82,047
La teneur en eau (%)	3,32
Porosité (%)	2,75
Module de finesse	0,86

L'analyse granulométrique du sable de Boussaâda est illustrée dans la figure ci-dessous :

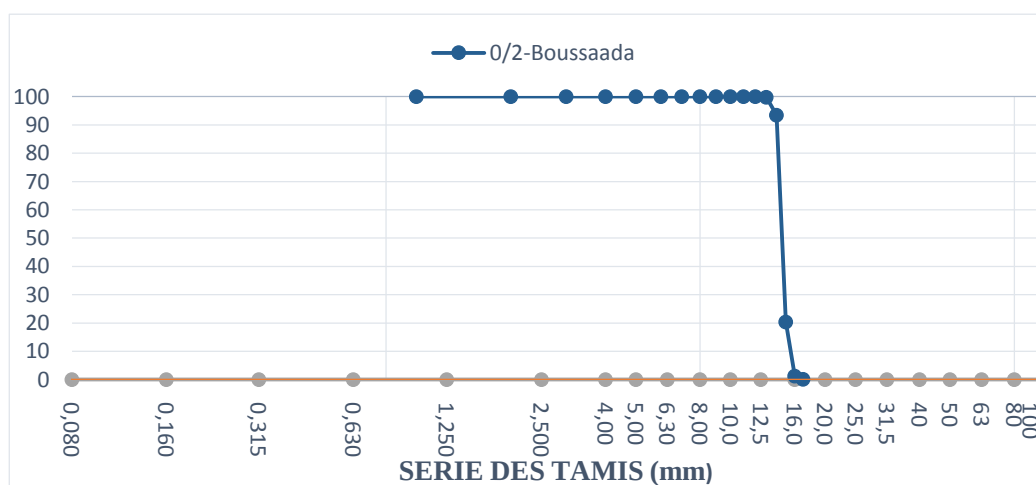


Figure V.1:Granulométrie du sable de Boussaâda

L'analyse minéralogique de sable de Boussaâda montre qu'il contient les minéraux suivant : Hydroxyde de fer, quartz, oxyde de fer et des chlorites.

Le (Tableau V.6) représente les désignations et la composition chimique du sable de dune de Boussaâda sans broyage.

Tableau V.6 : Analyse chimique du sable de Boussaâda

Les composants	Résultats
Insolubles « silice + silicates »	94,88 (%)
Oxyde de Fer et d'Alumine	0,75
Sulfates (CaSO ₄ , 2H ₂ O)	Traces
Chlorures (NaCl)	0,41
Carbonate (CaCO ₃)	4,46
Anhydrite carbonique (CO ₂)	1,96
Perte au Fer à 1050 °C	2,76
Eau de constitution (H ₂ O)	0,89

II.3 Les poudres fines

Les poudres fines (sable des dunes et brique réfractaire) utilisées dans ce travail, sont d'origine locale. Pour produire des bétons fibrés (BFUHP) à base de ces poudres, nous avons utilisé la fumée de silice comme un constituant fin afin de comparer les propriétés obtenues avec celles d'un béton témoin à base de la fumée de silice. Les ajouts minéraux utilisés dans cette étude sont : la fumée de silice, le sable de dunes et la brique réfractaire.

II.3.1 La fumée de silice (FS)

La fumée de silice utilisée dans notre étude est un produit commercialisé par SIKa. Elle est conforme à la norme NF P 18-502 et NF EN 13263-1. Le SIKa S95 est une silice ultrafine issue de l'industrie de la fabrication du silicium ou des alliages à base de silicium.

II.3.2 Le sable de dunes broyé (SDB)

C'est un sable fin doré de la région de Boussaâda dont la dimension maximale des gros grains est de 0,5 mm. Ce sable a été broyé au hall technologique (EX INIM) jusqu'à une finesse supérieure à 5500 cm²/g. La composition chimique et la granulométrie du sable de dune broyé sont représentées dans les tableaux suivants :

Tableau V.7 : Analyse chimique du sable de dune broyé

Elément	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	P.F	SO ₃	Total
%	88,37	1,38	1,25	4,51	0,17	3,55	0,14	99,84

Tableau V.8 : Analyse granulométrique du sable de dune broyé

V (µm)	0,363	0,417	0,479	0,550	0,631	0,724	120,20	363,10	416,87	10000
V (%)	0,00	0,00	0,07	0,12	0,19	0,27	0,45	0,97	0,81	0,00

II.3.3 La brique réfractaire broyée (BRB)

La brique réfractaire est récupérée de l'unité MFG, on a utilisé 3 types (briques réfractaires à base d'alumine, briques réfractaires à base de magnésium et briques réfractaires à base de Zirconium). Elles ont subi des procédés de préparation des ajouts cimentaires, à savoir le concassage, le broyage et le tamisage jusqu'à une finesse supérieure à 3500 cm²/g. La poudre ainsi finement broyée a été caractérisée avant d'être utilisée dans la composition du béton.

La composition chimique du BRB est représentée dans le tableau suivant :

Tableau V.9 : Analyse chimique de brique réfractaire broyée

Elément	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂
%	56,68	7,81	1,39	2,62	29,21	0,06	0,19	0,50	0,10	0,22

Tableau V.10 : Analyse granulométrique de brique réfractaire broyée

V (µm)	0,240	0,275	0,316	0,363	0,417	0,479	316,228	363,078	416,869	10000,000
V (%)	0,00	0,01	0,09	0,14	0,20	0,29	1,02	0,80	0,12	0,00

II.4 Eau de gâchage

L'eau utilisée pour le gâchage du béton est une eau potable de la ville de Boumerdes.

II.5 Les adjuvants

L'adjuvant utilisé est un super plastifiant haut réducteur d'eau dit « MEDAFLOW 30 » fabriqué par GRANITEX.

II.6 Les fibres

MEDAFAC est une fibre de polypropylène, ses caractéristiques techniques lui permettent d'augmenter les résistances mécaniques surtout en flexion et avoir une très bonne résistance à l'abrasion. Le dosage des fibres MEDAFAC peut varier de 2 à 6 %. Le dosage optimal doit être déterminé en fonction du type de béton et des effets recherchés. (106)

Caractéristiques

- Longueur..... 12 mm
- Largeur..... 0,18 mm

III. FORMULATION DES BETONS

Des bétons fibrés ultra hautes performances (BFUHP), ont été élaborés afin de voir l'influence des poudres fines et du sable des dunes sur les performances du béton. Le sable de

dune est utilisé à la fois comme granulat pour le béton et aussi comme ajout minéral fin (le sable est finement broyé).

Afin de voir l'influence des poudres fines sur les performances physico-mécaniques du BFUHP, des variantes des bétons ont été établies à partir du béton témoin (BT). Les BFUHP étudiés ont la composition résumée dans tableau suivant :

Tableau V.11 : Composition des différents types de bétons étudiés

	Ciment (Kg)	SDF (Kg)	SD (Kg)	FS (Kg)	DBR (Kg)	FP (Kg)	SP en (ext. sec)
BT	710	1020	215	230	-	1	12
BDBR1	710	1020	215	-	230	1	12
BDBR2	710	1020	215	-	230	1	12
BDBR3	710	1020	215	-	230	1	12

Les divers essais réalisés sont:

- Essai à l'état frais : La fluidité par étalement au min-cône.
- Essai à l'état durci à chaque âge (2, 7 et 28j) : masse volumique apparente, résistances mécaniques (à la traction par flexion et à la compression).

VI. RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Pour effectuer l'étude expérimentale, des échantillons prismatiques (40x40x160 mm³) ont été préparées pour chaque mélange. Un jour après la coulée, les échantillons ont été stockés dans l'eau à la température de 21 ± 1 C°. Les autres spécimens qui ont la même formulation de BFUHP, ont été soumis à un traitement thermique approprié (60°C pendant 8 h) après 7 jours de durcissement dans l'eau, ces éprouvettes sont encore conservées dans de l'eau pendant 28 jours (106) (108). Après avoir effectué les essais physico-mécaniques sur les éprouvettes du béton fibré ultra haute performance, on vient à donner les résultats de ces essais ainsi que leurs interprétations.

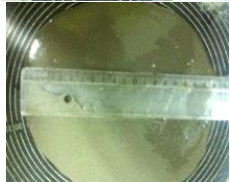
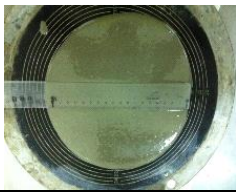
VI.1 Propriétés du BFUHP à l'état frais

VI.1.1 La fluidité des bétons

Pour chaque formulation du BFUHP, nous avons mesuré l'étalement du béton au mini cône. La fluidité a été mesurée à 20°C. La procédure d'essai d'écoulement était selon la spécification et les lignes directrices pour béton autoplaçant (EFNARC) (109).

Les résultats de l'essai sont présentés dans le (Tableau V.12) :

Tableau V.12: Caractéristiques des bétons étudiés à l'état frais

	Étalement (cm)		E/L	Mv (Kg/m ³)
	Sans fibre	Avec fibre		
Béton témoin	 21	 20	0,182	2,3730
BI (SDB)	 21	 20	0,182	2,3722
BII (BRB)	 22	 21	0,182	2,3690
BIII (mix)	 19	 18	0,182	2,3701

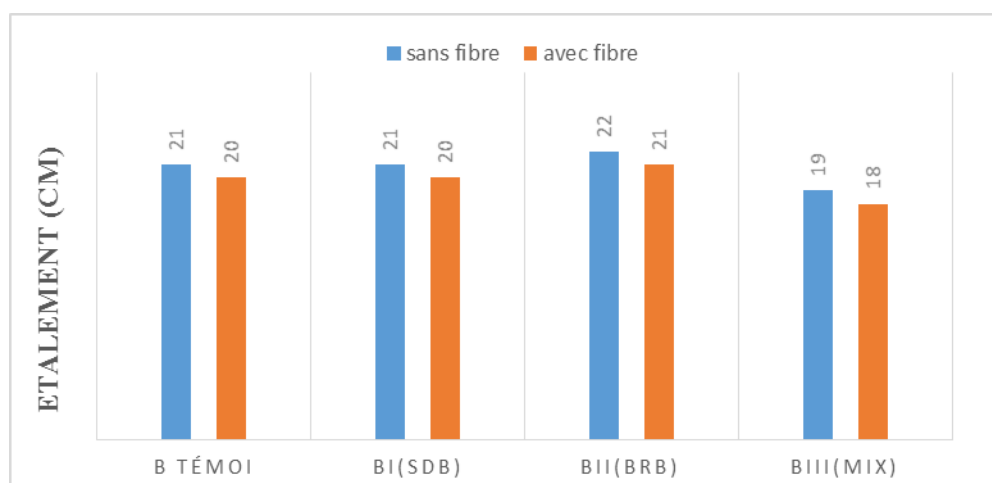


Figure V.2 : Fluidité des différents bétons étudiés à base de CEM I

Les résultats des essais d'étalement au mini-cône des BFUHP étudiés, sont représentés sur l'histogramme de la (Figure V.2). D'après cette figure, on remarque que quel que soit la nature de l'ajout minérale, tous les bétons présentent un étalement qui varie entre 18 et 22 cm de diamètre qui correspondent à un béton fluide. Cependant, par rapport au BFUHP témoin

(BT), on observe clairement l'effet de l'incorporation des fibres sur la fluidité des bétons. En effet, les fibres ont diminuées légèrement la fluidité des bétons, cela est expliqué par le fait que les fibres ont une forme d'aiguilles qui freine un peu l'écoulement du béton.

VI.2 Propriétés de BFUHP à l'état durci

Les essais de la résistance à la compression et la résistance à la flexion ont été réalisées pour évaluer les performances mécaniques des échantillons de béton qui ont été durcies dans l'eau saturée à $(21 \pm 1 \text{ C}^\circ)$ pendant 2, 7 et 28 jours selon la norme ASTM C348 et C349 (98), (99). La densité apparente de tous les bétons étudiés est également mesurée, selon la norme ASTM C642 (110).

VI.2.1 La masse volumique apparente

La (Figure V.3) montre l'évolution de la masse volumique apparente des différents bétons élaborés. Selon les résultats, tous les bétons ont une masse volumique presque identique quel que soit la nature de l'ajout utilisé (BI : avec sable des dunes, BII : avec briques réfractaire et BIII : avec mélange mixte ; 50 SD/50BR). La masse volumique des bétons enregistrée est de l'ordre $2370 \pm 1 \text{ Kg/m}^3$. Cela est expliqué par le fait que les poudres fines utilisées ont une masse spécifique presque identique.

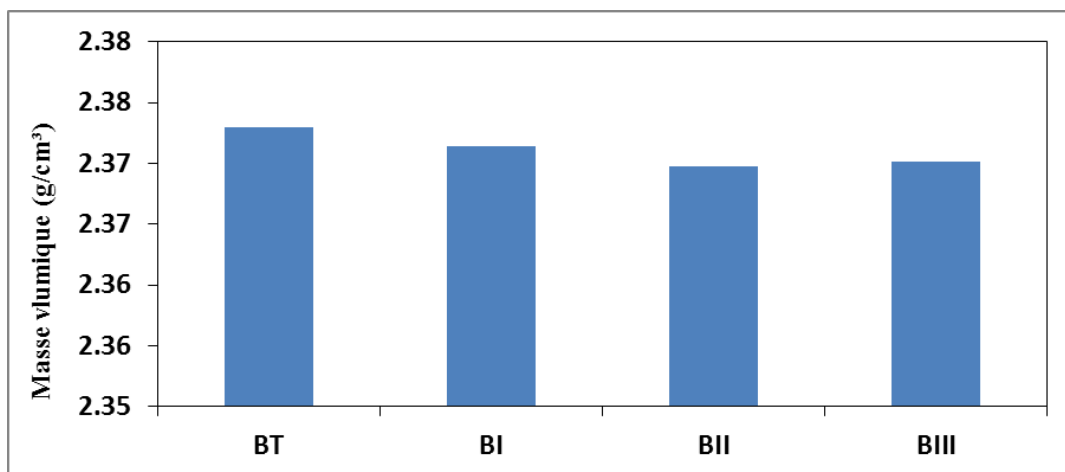


Figure V.3: Masse volumique apparente des différents bétons étudiés

VI.2.2 Résistance mécanique des bétons

Les essais mécaniques effectués sur les bétons durcis sont les suivants : la résistance mécanique à la compression et la résistance mécanique à la flexion. Pour effectuer cet essai, on a préparé trois éprouvettes (4*4*16) (cm), pour chaque âge (2, 7, 28 jours) dans le but de prendre une valeur moyenne. Les éprouvettes préparées auparavant sont émergées dans l'eau juste après le démoulage à une température de 20°C. Cette opération est effectuée pour éviter l'évaporation d'eau au cours de la phase de prise du ciment et assurer le bon déroulement de durcissement, afin de maintenir la caractéristique réelle du béton.

Avant de passer à l'action d'écrasement, il faut tenir compte des recommandations suivantes :

- Essuyer toute humidité excessive de la surface d'éprouvette avant de la positionner dans la machine d'essai.
- Tous les plateaux de la machine d'essai doivent être essuyés et toutes particules ou corps étrangers retirés des surfaces de l'éprouvette qui seront en contact avec eux.
- Centrer l'éprouvette sur le plateau avec une précision de la dimension du diamètre de l'éprouvette cylindrique.

Béton témoin

Tableau V.13 : Résultats des essais mécaniques du béton témoin

Résistance mécanique							
Caractéristique	Résistance à la Compression			Résistance à la flexion			
	Age	2j	7j	28j	2j	7j	28j
	BT	66,86	84,43	119,62	11,90	18,95	24,60

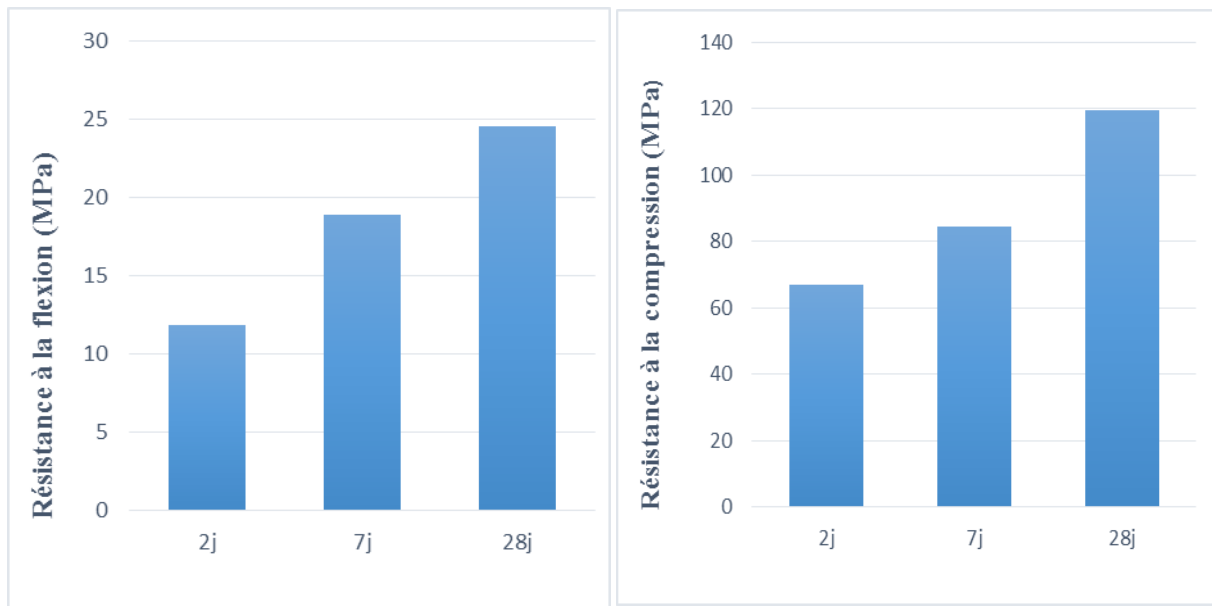


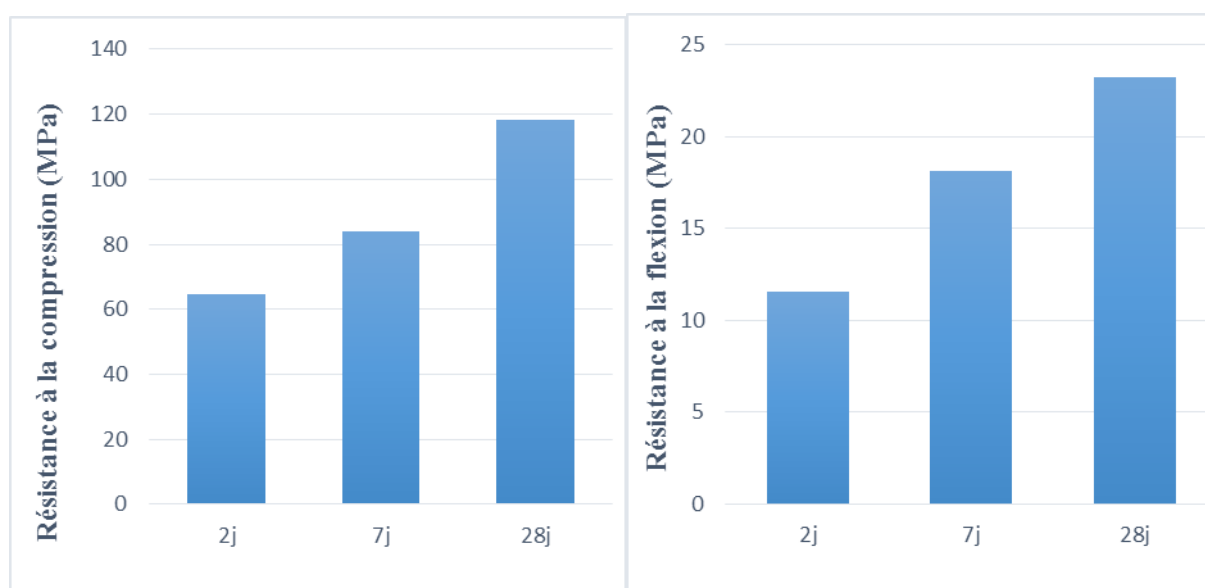
Figure V.4: Résistance à la flexion Et à la compression du béton témoin

Les résultats des essais mécaniques (résistance à la compression et à la flexion) du béton témoin, sont présentés dans la (*Figure V.4*). Nous remarquons que l'évolution des résistances mécaniques en fonction d'âge de durcissement est une fonction croissante. En effet, la résistance (compression ou flexion) augmente en fonction d'âge de durcissement. Ceci est traduit par l'effet de l'hydratation des minéraux du clinker contenu dans le ciment utilisé (CEM I 52,5). Les valeurs de résistance enregistrées sont environ 120 MPa et 25 MPa respectivement pour la résistance à la compression et à la flexion.

Bétons I (SDB)

Tableau V.14 : Résultats des essais mécaniques du béton I

Résistance mécanique						
Caractéristique	Résistance à la Compression			Résistance à la flexion		
	Age	2j	7j	28j	2j	7j
BI	64,76	83,89	118,40	11,53	18,14	23,23

**Figure V.5: Résistance à la compression et à la flexion du béton BI**

La (Figure V.5) donne l'évolution de la résistance à la compression et à la flexion du béton BI (avec le sable des dunes broyé) en fonction d'âge de durcissement. Nous remarquons que l'évolution des résistances mécaniques est aussi une fonction croissante. Cependant, à 28 jours la valeur de la résistance à la compression est d'environ 118 MPa et celle de la flexion est de l'ordre de 23 MPa. Ces résultats montrent que le sable des dunes finement broyé a joué un rôle important dans le développement des résistances mécaniques.

Béton II (BRB) :

Tableau V.15 : Résultats des essais mécaniques du béton II

Résistance mécanique en						
Caractéristique	Résistance à la Compression			Résistance à la flexion		
Age	2j	7j	28j	2j	7j	28j

BII	59,70	78,92	115,11	10,95	15,78	19,96
-----	-------	-------	--------	-------	-------	-------

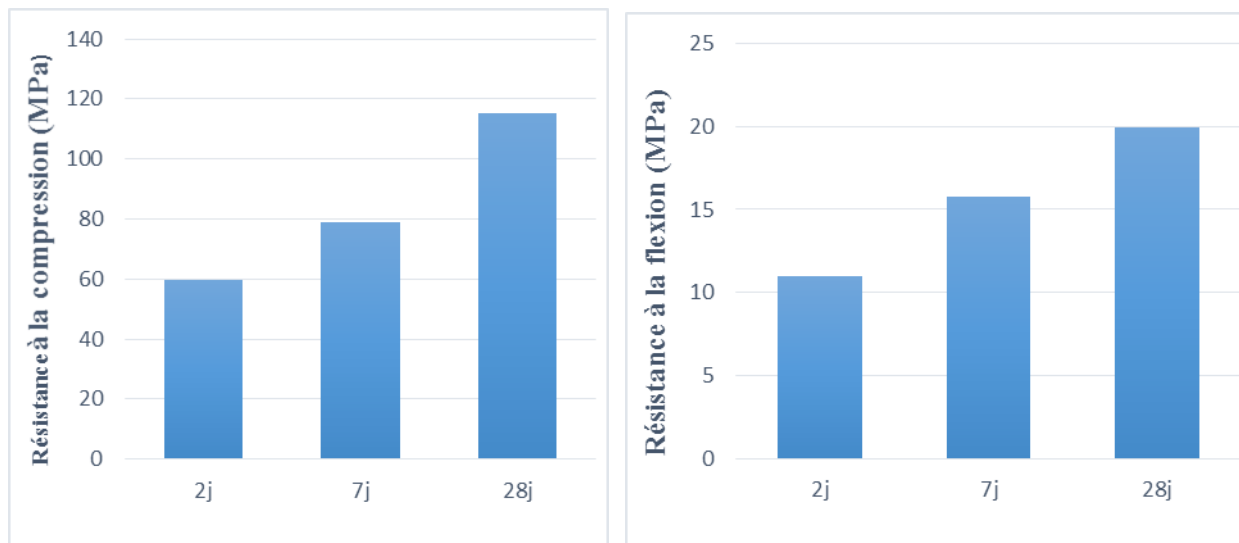


Figure V.6 : Résistance à la compression et à la flexion du béton BII

La (Figure V.6) donne l'évolution de la résistance à la compression et à la flexion du béton BII (avec de la brique réfractaire broyé) en fonction d'âge de durcissement. Nous observons une évolution similaire avec les deux cas précédents (BI et BII). Cependant, la valeur de la résistance à la compression du béton BII à 28 jours, est environ 115 MPa et celle de la flexion est de l'ordre 20 MPa, ces valeurs de résistance sont proche de celles du béton témoin et du béton BI. D'après ces résultats, on peut dire que la brique finement broyée a également joué un rôle important dans le développement des résistances du béton.

Béton III (MIX) :

Tableau V.16 : Résultats des essais mécaniques du béton III

Caractéristique	Résistance mécanique en					
	Résistance à la Compression			Résistance à la flexion		
Age	2j	7j	28j	2j	7j	28j
BIII	61.62	80.65	116.66	11.20	16.63	22.26

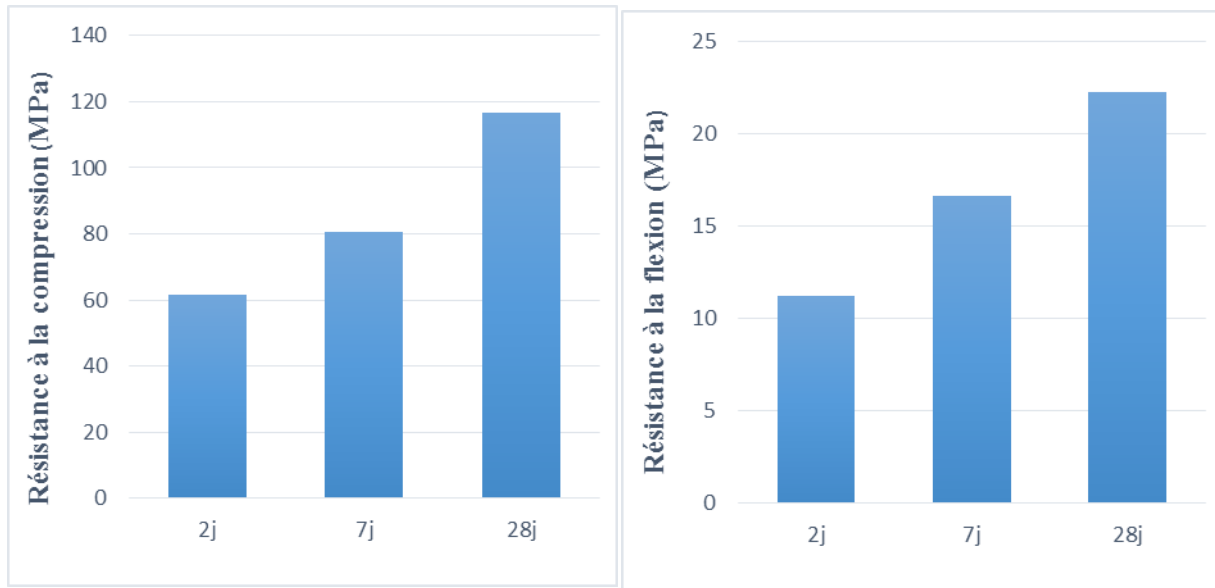


Figure V.7 : Résistance à la compression et à la flexion du béton BIII

L'évolution de la résistance à la compression et à la flexion du béton BIII (mélange mixte 50/50) en fonction d'âge de durcissement est illustrée dans la (Figure V.7). D'après cette figure, nous observons que l'effet du mélange fin du sable des dunes et de la brique réfractaire (50/50) est bénéfique et peut être considéré comme ajout minéral fin pour un BFUHP. En effet, la combinaison de ces deux poudres a donné des valeurs de résistance (compression et flexion) proche de celles du béton témoin BT. Cependant, la valeur de résistance à la compression du béton BIII enregistré est environ 116 MPa et celle de la flexion est de l'ordre 22 MPa.

V. COMPARAISON ENTRE LES BETONS ELABORES

Afin de comparer les différentes formulations des bétons, nous avons procédé à étudier l'effet des poudres fines utilisées sur les propriétés du BFUHP. Les (Figures V.8 (a)) et (Figure V.8 (b)), représentent l'évolution des résistances mécaniques (compression et flexion) en fonction d'âge de durcissement 2, 7 et 28 jours.

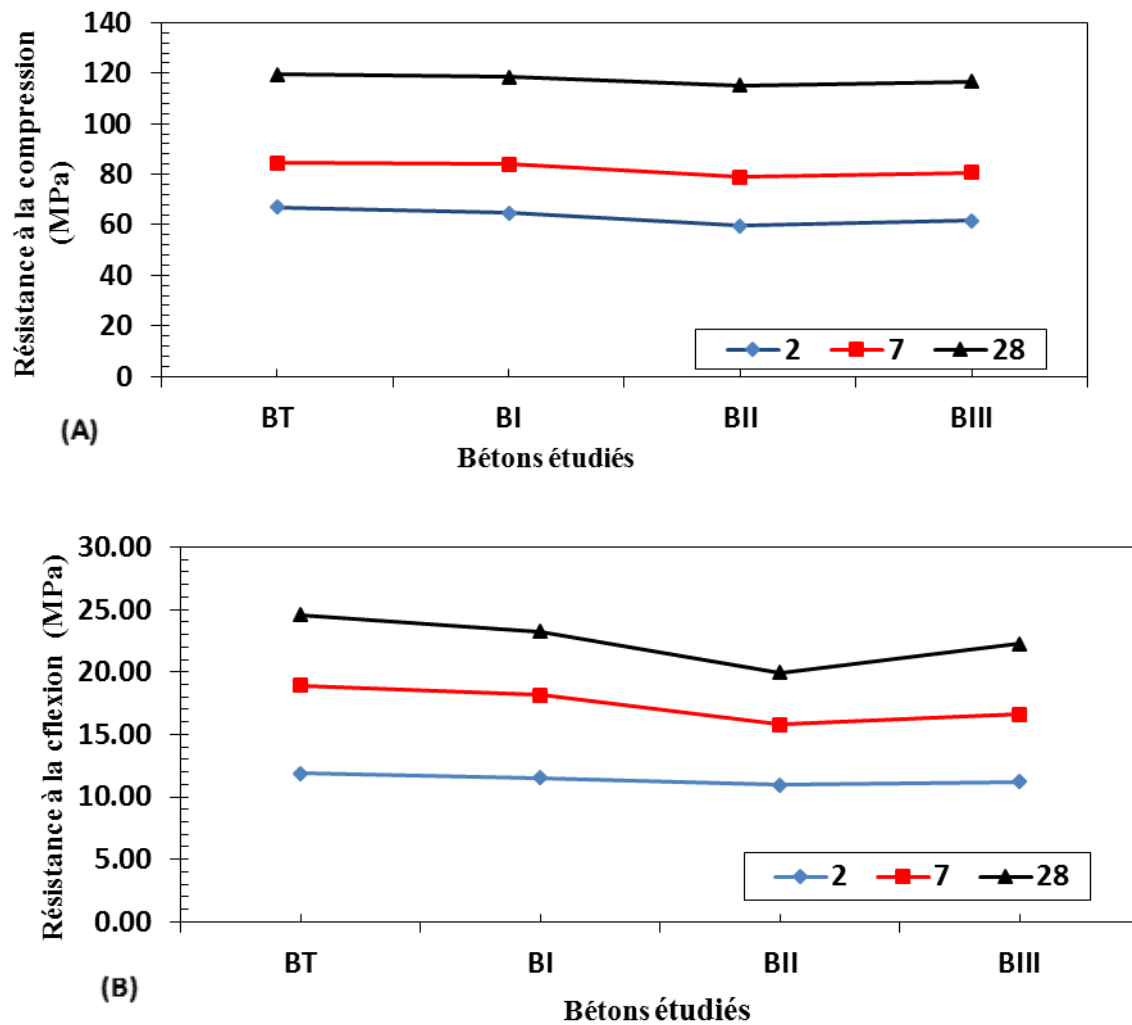


Figure V.8 : Effet de la nature des poudres fines sur le développement de la résistance mécanique (a) à la compression (b) à la flexion

Par rapport au béton témoin, il est remarquable d'après ces figures, que la résistance à la compression des bétons est presque identique quel que soit la nature de la poudre. Cela veut dire que les poudres finement broyées (sable des dunes et la brique réfractaire) peuvent être utilisées dans la formulation des BFUHP. Egalement, la fumée de silice qui est très couteuse, peut être substituée par ces poudres pour produire des BFUHP allons jusqu'à 120 MPa de résistance à la compression et 22 MPa de résistance à la traction par flexion.

IV. CONCLUSION

Cette dernière partie d'étude est une approche expérimentale sur le recyclage des déchets de briques réfractaires comme matériau cimentaire supplémentaire pour produire un béton ultra-hautes performances (BFUHP). Il ressort de cette étude les principaux points suivants :

- Tous les bétons étudiés ont une masse volumique apparente presque identique quel que soit la nature ou le type des poudres utilisées par remplacement de la fumée de silice.
- Les résultats des essais d'étalement au mini-cône les bétons étudiés, ont montré que tous ces derniers présentent un étalement qui varie entre 18 et 21 cm de diamètre qui correspondent à un BFULHP.
- Les valeurs de résistance à la compression enregistrées sont de l'ordre 120 MPa pour tous les bétons. Cependant, les bétons élaborés à base des poudres fines ont des valeurs de résistance presque proche de celle obtenus par le béton témoin à base de la fumée de silice.
- En comparant le prix de la fumée de silice, les bétons élaborés à base de sable des dunes ou de la brique réfractaire finement broyées, sont plus au moins acceptable. Pour avoir des bétons avec des résistances plus élevées au-delà, de 150 MPa, il faut augmenter le broyage de ces poudres.

CONCLUSION GENERALE

L'objectif de ces travaux de thèse de doctorat était de contribuer expérimentalement à la valorisation et au recyclage des déchets inorganiques dans la production des bétons spéciaux afin de protéger l'environnement et de minimiser les besoins en matériaux granulaires.

L'étude expérimentale a été menée sur trois volets : le recyclage et la valorisation de déchets de verre pour fabriquer des granulats de mousse de verre qui ont été utilisés comme sable dans un mortier autoplçant. Egalement, le deuxième volet a été consacré à la réutilisation des déchets marins (coquilles de mer) comme ajout minéral et granulats fins (sable) pour fabriquer un béton autoplçant. Le dernier volet du travail, était le recyclage des déchets de brique réfractaire en tant qu'ajout cimentaire dans les bétons fibrés hautes performances.

Les principaux résultats ont mis en évidence l'intérêt économique et technique de la valorisation du déchet de verre dans l'industrie des bétons (chapitre III). En effet, la substitution du sable par les granulats fins de mousse de verre (fabriqués à partir de déchet de verre), a légèrement diminuée la fluidité des mortiers autoplçants. Cependant, les granulats de mousse de verre, ont aussi diminué la densité en vrac de tous les mélanges des mortiers autoplçants. Jusqu'à 100% du remplacement du sable par la mousse de verre. Ainsi, la densité en vrac des mortiers est de l'ordre de 1750 kg/m^3 . L'étude microscopique de l'interface granulats/matrice cimentaire des éprouvettes de mortiers par microscope électronique à balayage MEB, a permis de conclure que la forme des grains de mousse de verre ainsi que leurs porosité, ont joué un rôle important dans l'adhérence des grains avec la matrice cimentaire.

La seconde partie de ce travail, a montré l'influence des coquilles de mer (comme ajout fin et comme sable) sur les propriétés physicomécaniques du béton autoplçant. Il est donc possible de fabriquer un béton autoplçant à partir des coquilles de mer concassées (comme sable) et aussi broyées (comme ajout minéral) sans perturber les propriétés essentielles du béton autoplçant. En effet, la fluidité des bétons autoplçants élaborés à base de ce type des déchets a été légèrement influencée mais elle était acceptable pour un béton autoplçant. Le béton BAP 5 a une fluidité plus au moins faible par rapport aux autres mélanges. Par rapport au béton témoins BAP 1 (avec fillers calcaire et du sable naturel), tous les bétons présentent des valeurs de fluidité qui correspondent à un BAP d'une fluidité acceptable. Les valeurs de la résistance à la compression obtenues étaient presque les mêmes pour tous les mélanges et par rapport aussi au béton témoin quel que soit l'âge du durcissement. Egalement, les valeurs de résistance à la compression sont presque identiques quel que soit la manière de substituer le fillers calcaire ou

du sable. La substitution des fillers calcaire par les coquilles de mer finement broyées (comme ajout fin) ainsi que la substitution du sable par les coquilles de mer concassées (comme sable) a nettement amélioré la compacité des bétons provoquant ainsi une augmentation du module d'élasticité dynamique.

Enfin, le dernier volet de cette thèse a montré l'importance économique et technique du recyclage des déchets de brique réfractaire dans les bétons. L'effet de la brique réfractaire finement broyée comme ajout fin (par une substitution totale de la fumée de silice) sur les performances physicomécaniques d'un béton haute performance (BFUHP), a été bénéfique et significatif. Les résultats des essais d'étalement au mini-cône des bétons étudiés, ont montré que tous ces derniers présentent un étalement qui varie entre 18 et 21 cm de diamètre correspondant à un BFUHP. Aussi, les valeurs de résistance à la compression enregistrées sont de l'ordre 120 MPa pour tous les bétons. Cependant, les bétons élaborés à base des poudres fines ont des valeurs de résistance presque proches de celles obtenus par le béton témoin à base de la fumée de silice. En comparant le prix de la fumée de silice, les bétons élaborés à base de sable des dunes ou de la brique réfractaire finement broyée, sont plus au moins acceptable. Pour avoir des bétons avec des résistances plus élevées au-delà, de 150 MPa, il faut augmenter le broyage de la brique réfractaire.

Enfin, les trois types de déchets choisis dans cette étude ont montré un intérêt double, aussi environnementale qu'économique. En effet cette initiative permet de préserver l'environnement des déchets inorganiques par leur réutilisation (recyclage) dans le secteur des bétons d'un côté et de répondre aux besoins en ressources minérales dans cette industrie des bétons d'un autre côté.

PERSPECTIVES

En perspective de ce travail de recherche, il pourrait être intéressant de compléter l'étude des bétons élaborés dans cette thèse en traitant la durabilité de ces derniers vis-à-vis des milieux agressifs tels que les eaux sulfatés et les acides.

Par ailleurs, il serait intéressant d'étudier l'effet de la température sur les propriétés physico-mécaniques des bétons étudiés à base de ces déchets. Par l'étude de l'influence des trois types de déchets (verre, brique réfractaire et coquilles de mer) sur les performances du béton choisi, sous l'effet de la température, afin de réaliser des éléments préfabriqués par la méthode de séchage.

References bibliographiques

- (01) Gunning, J. G. "concrete technology". Level 4 longman technician series. Const and civil engineering, England, 1983.
- (02) "Guide de prescription des ciments pour des constructions durables". centre d'information sur le ciment et ses applications. Collection technique Cimbéton. pp10-15.
- (03) Loumachi, L. "effet des granulats de la région de Biskra sur les propriétés du béton et les méthodes de formulation de mélange" mémoire de magistère. Univ Biskra. 2011
- (04) ERCE, CTC-Est, GRANITEX. "Les adjuvants : définitions et opportunités d'utilisation". Journée d'information « ciment, bétons, adjuvants ». 2004.
- (05) Georges Dreux, Jean Festa, Nouveau guide du béton et de ses constituants, Paris, Edition Eyrolles, 2009.
- (06) "NORME EN 206-1: BETON Partie 1: Spécification, performances, production et conformité" Centre de Ressources des Technologies de l'Information pour le Bâtiment. octobre 2007.
- (07) GEBLER, S.H. et KLIEGER, P. (1986) Effect of Fly Ash on the Durability of Air-Entrained Concrete, ACT SP-91, p 483-519
- (08) Helmuth, R.A. (1986). Water-reducing properties of fly ash in cement pastes, mortars, and concretes; Causes and test methods. In Anonyme, Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete (p. 723-740), Proceedings - Second International Conference. Detroit, MI, USA, American Concrete Inst.
- (09) Z. Rahmouni, M. Belouadah, N. Tebbal. "Influence des additions minérales sur les propriétés à l'état durci des bétons ordinaires à base de matériaux locaux". Université de M'sila, Algérie, 2012.
- (10) EL Barrak M, "contribution à l'étude de l'aptitude à l'écoulement des bétons autoplaçants à l'état frais". Thèse de Doctorat. Université Toulouse 3. 2005.
- (11) BARON J. et OLLIVIER J.P., « Les Bétons – Bases et données pour leur formulation », éditions Eyrolles, 1996.
- (12) Okamura N., Fujimoto Y., Kuwabara S., & Yagi A. 1994. High performance liquid chromatography determination of carnolic acid and carnosol in Rosmarinus officinalis and Salvia officinalis. J Chrom A. 679:381–386.
- (13) Trudel A. (1996) Workability, uniformity, and structural behavior of high-performance self-compacting concrete, (in French) Masters Thesis, Université de Sherbrooke, Canada, 198p.
- (14) [Hasni 99]. Hasni, « Bétons Autoplaçants », rapport de recherche N° 98-004/98-006, Fédération Française du Bâtiment 1999.
- (15) Benkachkache, G. "étude de comportement différé des bétons autoplaçants ; influence des paramètres de composition et de chargement" mémoire de magistère. Université Mentouri de Constantine. Algérie. 2007. pp15-16
- (16) Association Française de Génie Civil, "Bétons autoplaçants Recommandations provisoires", documents scientifiques et techniques, AFGC, juillet 2000.
- (17) RILEM, "Self-Compacting Concrete. State-of-the-art report of RILEM Technical Committee 174-SCC", Edited by A. Skarendahl and O. Petersso, RILEM Publications, France, 2001.
- (18) Pedersen B., Smeplass S., "The relationship between the rheological properties of SCC and the corresponding matrix phase", Proceedings of the Third International Symposium on Self-Compacting Concrete, Reykjavik, Islande, pp. 106-116, 2003.
- (19) Smeplass S., Mortsell E., "The particle matrix model applied on SC", Proceedings of the Second International Symposium on Self-Compac Concrete, Tokyo, Japon, pp. 267-276, 2001.

- (20) Gibbs j.c, Zhu W, "Strength of hardned self compacting concrete".proceedings of third internationalsymposium on self-compacting concrete. Reykjavik.Island, pp49-58,2003.
- (21) Assié S., "Durabilité des bétons autoplaçants", Thèse de doctorat de l'INSA de Toulouse,2004.
- (22) SHAH S.P.; AHMAD S.H. "High performance concretes and applications" Edward Arnold, ISBN 0-340-58922-1, 1994.
- (23) FEVRE C. (Ed.), « Projet National BHP 2000 – Les bétons à hautes performances Guides pratiques (3 tomes) », Paris : IREX, 2002, 2003.
- (24) DE SHUTTER ; « le béton à hautes performances ». Bulletin publié par : FEBELCEM fédération de l'industrie Belge – (juillet 2007)
- (25) Roy D.M., Gouda G.R., High strength generation in cement pastes. Cement and Concrete Research, vol. 3, no.6, 1973, p. 807-820.
- (26) Bache H.H., Densified cement/ultrafine particle-based materials. 2nd international conference on superplasticizers in concrete Ottawa, Canada, june 10-12, 1981.
- (27) Richard P., Cheyrezy M.H., Reactive powder concretes with high ductility and 200–800 Mpa compressive strength. Cement and Concrete Composites, 1995.
- (28) AFGC, Bétons fibrés à ultra-hautes performances. Recommandations provisoires, janvier 2002.
- (29) Cheyrezy M., Applications structurales du BPR. Conférence AFPC-AFREM sur les Bétons à Hautes Performances et les bétons à Ultra Hautes Performance, INSA de Lyon, 3 juin 1998.
- (30) AFNOR, NF EN 197-1, Ciment - Partie 1 : Composition, spécifications et critères de conformité, Février 2001.
- (31) Wuest, j. (2007) : "Comportement structural des bétons de fibres ultra performants en traction dans des éléments composés", Thèse doctorat, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne.
- (32) Granger, S. (2006) : "Caractérisation expérimentale du phénomène d'autocicatrisation des fissures dans les bétons", Revue Européenne de Génie Civil, Vol. 10, No. 3, pp. 279 – 294.
- (33) Parant, E. (2003) : "Mécanismes d'endommagement et comportements mécaniques d'un composite cimentaire fibré multi-échelles sous sollicitations sévères: fatigue, choc, corrosion", Thèse doctorat, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC).
- (34) Chan, Y.W., Chu. S.H. (2004): "Effect of silica fume on steel fiber bond characteristics in reactive powder concrete", Cement and concrete research, Vol. 34, pp. 1167 – 1172.
- (35) De Larrard F., Sedran T., Une nouvelle approche de la formulation des Bétons. Annales du bâtiment et des travaux publics, no.6, Décembre 1999, p. 39-54.
- (36) Neville A.M., Properties of concrete. Fourth Edition, England: Longman Edition, 1995, p 844.
- (37) AFNOR, NF EN 934-2/A2, Adjuvants pour béton, mortier et coulis-Partie2 : adjuvants pour béton Définitions, exigences, conformité, marquage et étiquetage, AFNOR avril 2006.
- (38) Papayianni, I., Tsohos, G., Oikonomou, N., Mavria, P. (2005): "Influence of superplasticizer type and mix design parameters on the performance of them in concrete mixtures", Cement and Concrete Research, Vol. 35, pp. 217 – 222.
- (39) Liao, W-C., Chao, S-H., Park, S-Y., Naaman, A.E. (2006): "Specification and Guidelines for Self-Consolidating Concrete (SCHPFRFC)", The University of Michigan College of Engineering, pp. 1 – 80.
- (40) Rougeau P, Boulet D, Shink M., Les bétons à Ultra Hautes Performances (BUHP). Synthèses des connaissances et étude de faisabilité sur prototype de laboratoire, Document de CERIB DDI 002, 2000.

- (41) Denarié, E. (2005): "SAMARIS D22 Report on test of Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete in field trials", Deliverable D22, Project SAMARIS (Sustainable and Advanced Materials for Road infrastructures), Workpackage 14, 63 pages.
- (42) Orange, G., Dugat, J., Acker, P. (2000): "Ductal: New Ultra-high Performance Concretes - Damage Resistance and Micromechanical Analysis", 5th International Rilem Symposium on Fibre Reinforced Concretes BEFIB, Lyon (France), pp. 781 – 790.
- (43) Rossi, P., Renwez S., Belloc, A. (1995) : "Les bétons fibrés à ultra-hautes performances", Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, Vol. 196, pp. 61 – 66.
- (44) De Larrard, F., Sedran, T. (1994) : "Optimization of ultra-high performance concrete by using a packing model", Cement and Concrete Research, Vol. 24, No. 6, pp. 997 – 1009.
- (45) Richard, P., Cheyrezy, M. (1995) : "Composition of reactive powder concretes". Cement and Concrete Research, Vol. 25, No. 7, pp. 1501 – 1511.
- (46) Rossi, P. (1997 a): "High Performance Multimodal Fiber Reinforced Cement Composites (HPMFRCC): The LCPC Experience", ACI Materials Journal, Vol. 94, No. 6, pp. 478 – 483.
- (47) Grabowski, E., Gillott J. E. (1989): "Effect of replacement of silica flour with silica fume on engineering properties of oilwell cements at normal and elevated temperatures and pressures", Cement and Concrete Research, Vol. 19, Issue 3, pp. 333 – 343.
- (48) Bonneau O., Etude des effets physico-chimiques des superplastifiants en vue d'optimiser le comportement rhéologique des bétons à Ultra Hautes Performances. Thèse de doctorat, département de génie civil, université de Sherbrooke, Québec, Canada, 1997.
- (49) Van Mier, J. G. M. (1997): "Fracture process of concrete", CRC Press, Boca Raton, Florida, USA, 1997, p. 448.
- (50) Bernard, O. (2000) : "Comportement à long terme des éléments de structures formés de bétons d'âges différents", PhD Thesis EPFL, No. 283, Lausanne.
- (51) Ludovic Missemmer. Etude du comportement sous tr`es hautes temp`eratures des b`etons fibr`es `a ultra performances : application au BCV. Autre. Université de Grenoble Alpes, 2011. P40.
- (52) B.A. Graybeal. Material property characterization of ultre-high performance concrete. U.s. department of transportation edition.
- (53) A. Spasojević. Structural implications of ultra-high performance fibre-reinforced concrete in bridge design. PhD thesis, EPFL, 2008.
- (54) P. Pimienta, J.-C. Mindeguia, A. Simon, and M. Behloul. Behaviour of UHPFRC at high temperatures. In Designing and Building with UHPFRC : State of the Art and Development, Marseille, France, 17-18 november 2009.
- (55) Sebaibi, N. (2007) : "comportement mécanique des mortiers renforcés par des micro fibres de carbone", travail de master 2 recherche à l'école des mines de Douai, pp. 1 – 59.
- (56) SEBAIBI Nassim « valorisation des composés thermodurcissables issus du recyclage dans une matrice cimentaire : application aux bétons à ultra-haute performance ».thèse de doctorat. Ecole des Mines de Douai Département Génie Civil et Environnemental, Ecole des Mines de Douai février 2010.
- (57) Bentur, A., Mindess, S. (1990): "Fibre reinforced cementitious composites", Elsevier Applied Science, London, 1990, ISBN 1-85166-393-2.
- (58) Xu, Y., Chung, D.D.L. (1999): "Carbon fiber reinforced cement improved by using silanetreated carbon fibers", Cement and Concrete Research, Vol. 29, pp. 773 – 776.
- (59) Hodne, H., Saasen, A., O'Hagan, A.B., Wick, S.O. (2000): "Effects of time and shear energy on the rheological behaviour of oilwell cement slurries", Cement and Concrete Research, vol 30, pp. 1759 – 1766.

- (60) A, Spasojevic. 'Applications structurales du Béton Fibré à Ultra-Hautes Performances aux ponts' Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) Laboratoire de Construction en Béton (IS-BETON).suisse .decembre 2008.p08.
- (61) Roux N., Andrade C, Sanjuan M.A., Etude expérimentale sur la Durabilité des Bétons de Poudres Réactives. Annales de L'ITBTP, no.532, 1995, p. 133-141.
- (62) Grattan-Bellew, P.E., J.-J. Beaudoin, Effect of aggregate particle size and composition on expansion of mortar bars due to delayed ettringite formation, Cem. Concr. Res., Vol. 28, No 8 : 1147-1156, 1998.
- (63) Touzouti k, 'introduction aux nanociments et nanobétons' mémoire de magistère UMMTO.p107.
- (64) Pr. N. EL JOUHARI . «Introduction à la technologie verrière» UNIVERSITE MOHAMMED V-AGDAL, FACULTE DES SCIENCES, DEPARTEMENT DE CHIMIE Filière SMC 4, CHIMIE MINERALE APPLIQUEE.
- (65) Ayadi A, « livre technologie de verre », Edition 2004, p 12.
- (66) Zhu, H, et Byars, EA. Alkali-silica reaction of recycled glass in concrete, alkali-aggregate reaction in concrete, Proceedings of the 12th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, (October 15–19, Canada), Quebec 2004. p. 811–20.
- (67) Barton J, Guillemet C, « le verre, science et technologie » l'éditeur EDP sciences, 2005
- (68) Diamond., S., «Alkali silica reactions – some paradoxes», Cement & Concrete Composites 19 [5/6], 391–401 (1997).
- (69) Idir, R . 'Mécanismes d'action des fines et des granulats de verre sur la réaction alcali-silice et la réaction pouzzolanique''. Thèse de doctorat. Université de Toulouse. Juillet 2009.
- (70) Ramachandran v, s (utilisation des déchets et sous-produits comme granulats de bétons), CBD 215-F, conseil national de recherche, Canada, (1981).
- (71) Prisca Chetelat, « rapport technique, domaine du bâtiment, isolation de verre cellulaire en vrac : utilisation de verre cellulaire dans le domaine du bâtiment » p 1-9, mars 2012.
- (72) rapport Technopor, granulat de mousse de verre, catalogue du Technopor, janvier 2012.
- (73) Bumanis G, Bajare D, Locs J, Korjamins A, « alkali-silica reactivity of foam glass granules in structure of lightweight concrete, construction and building materials 47,(2013),pp 274-281.
- (74) Shayan, A. et Xu, A., Value-added utilization of waste glass in concrete, Cement and Concrete Research, 1 (2004), 34, p.81-9.
- (75) Jin, C., Meyer, C. et Baxter, S., "Glasconcrete"-Concrete with glass aggregate, American concrete institute, Material Journal, (2000), 97, p.208-213.
- (76) Benhaoua, F. '' Étude de l'influence de l'ajout de silicates alcalins sur la porosité des mousses de verre élaborées à base de calcin' 'thèse de magistère. Univ Boumerdes.2012.
- (77) Ayadi A, « livre technologie de verre », Edition 2004, p 12.
- (78) Muhesh Limbachi, Mohamed Seddik Meddah, Soumela Fotiadou, « performance of granulated foam glass concrete » construction and building materials 28, (2002) 759-768.
- (79) Bumanis G, Bajare D, Locs J, Korjamins A, « alkali-silica reactivity of foam glass granules in structure of lightweight concrete, construction and building materials 47,(2013),pp 274-281.
- (80) Marsel Carlier et al, (Améliorer la valorisation des déchets industriels en BTP) PREDIS - Groupe de travail n° 5.guides techniques régionaux relatifs à la valorisation des déchets et coproduits industriels.

- (81) Mr CHAIB Hachem 'Contribution à l'Etude des Propriétés Thermo-Mécaniques des Briques en Terre Confectionnée par des Fibres Végétale Locale. (Cas de la ville de Ouargla).these de doctorat.UNIVERSITE KASDI MERBAH – OUARGLA.janvier 2017.p22.
- (82) LIVERT S., « Bâtir un mur en briques de terre compressée », Février 2011.
- (83) CRA Terre « Blocs de terre comprimée normes » Série Technologies,1998, France.
- (84) Folk R.L., Ward W.C., A study of significant of grain size parameters. J.Sediment.brazos River Petrol. 27, 1957, p. 3-26.
- (85) Weydert P., Étude sédimentologique d'une coupe de la partie médiane du grand récif de Tuléar (SW Madagascar). Téthys 1, 1971, p. 237-280.
- (86) BENTATA Aissa.'étude expérimentale d'un béton avec le sable de dune ' mémoire de magistère . université de Ouargla.juin 2004 . p32
- (87)Carter , G,J''Environmental and biological controls of bivalve shell mineralogy and microstructure. In skeletal growth of aquatic organisms. Biological records of environmental change. (Ed. D.C Rhodes and R.A.Lutz).plenum press,pp 69-115.
- (88) Badmus JA, Odunola OA, Yekeen TA et al. (2007) Evaluation of antioxidant, antimutagenic, and lipid peroxidation inhibitory activities of selected fractions of *Holarrhena floribunda* (G. Don) leaves. *Acta Biochim Pol* 60: 435–442
- (89) Park S.B, (2001). thèse de doctorat «mécanismes de ségrégation dans les BAP ».
- (90) Sid ahmed Hamza, Oualit Mehenna « formulation et caractérisation rhéologique d'un BAP, action de différents superplastifiants sur les propriétés rhéologiques » ; thèse d'ingénieur de l'université de Boumerdes, juin 2007.
- (91) Schwartzentruber A, Catherine C. "Method of the concrete equivalent mortar (CEM), a new tool to design concrete containing admixture", *Materials and Structures*. 2000; 33(8): 475-482.
- (92) Shen J, (2009) « Comportement mécanique des matériaux et des structures précontraintes en bétons autoplacants (BAP) ».Thèse de Doctorat de l'université de Reims champagne – Ardenne, France.
- (93) ASTM C642.(1993). Standard test method for specific gravity, absorption, and voids in hardened concrete, *Annual Book of ASTM Standards*, 04.02 Concrete and Concrete Aggregate.
- (94) Nguyen D. H, Boutouil M, Sebaibi N, and Baraud F (2013) "The use of seashell by products in previous concrete pavers", *World academy of science, engineering and technology, International journal of civil science and engineering*, vol 7, N ° 11, pp 285-392.
- (95) ASTM C597-97. (1993).Standard Test Method for Pulse Velocity through Concrete, *Annual Book of ASTM Standards*, 04.02 Concrete and Concrete Aggregate.
- (96) Brahim Safi., Mohamed Saidi, Abdelhakim Daoui, Bellal Ahmed, Mechekak Ali, Toumi Kamel, The use of seashells as a fine aggregate (by sand substitution) in self-compacting mortar (SCM), *Const. Build. Mater.* 78(1) 2015, pp. 430–448.
- (97) Richardson A. E., (2013), Sea shells used as partial aggregate replacement in concrete", *Structural Survey*, 31 (5), pp.347 – 354.
- (98) ASTM C348-08 "Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars." ASTM International, West Conshohocken, PA, 2008. DOI: 10.1520/C0348-08.
- (99) ASTM C349-08 "Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic-Cement Mortars (Using Portions of Prisms Broken in Flexure)." ASTM International, West Conshohocken, PA, 2008. DOI: 10.1520/C0349-08.
- (99) ASTM C 349 Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using Portions of Prisms Broken in Flexure).

- (100) Namdar A., Yahaya F.M., Enhancement of Cement Mortar Mechanical Properties with Replacement of Seashell Powder, World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Civil, Architectural Science and Engineering Vol:8 No:2, 2014.
- (101) Fernandes, M., Sousa, A., Dias. A. "Environnemental impact and emissions trade. Ceramic industry." A case study. Portuguese Association of the Ceramics Industry APICER; 2004.
- (102) Meyer, C. "The greening of the concrete industry." Cement and Concrete Composites. 31(8), pp. 601-605. 2009. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2008.12.010
- (103) Gartner, E. "Industrially interesting approaches to low-CO2 cements." Cement and Concrete Research. 34(9), pp. 1489-1498. 2004. DOI: 10.1016/j.cemconres.2004.01.021
- (104) Puertas, F., Garcia-Diaz I., Barba, A., Gazulla M., Palacios M., Gomez M., Martinez-Ramirez, S. "Ceramic wastes as alternative raw materials for Portland cement clinker production." Cement and Concrete Composites. 30(9), pp. 798-805. 2008. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2008.06.003
- (105) Lavat, A. E. , Trezza, M. A., Poggi, M. "Characterization of ceramic roof tile wastes as pozzolanic admixture." Waste Management. 29(8), pp. 1666-1674. 2009. DOI: 10.1016/j.wasman.2008.10.019
- (106) Edrogu, S., Kurbetci, S. "Optimum heat treatment cycle for cement of different type and composition." Cement and Concrete Research. 28(11), pp. 1595-1604. 1998.
- (107) Taфраoui, A., Lebaili, S., Slimani, A. "Study Physico-Chemical of the Sand of the Western Erg of the Area of Saoura (Western South Algeria)." Research Journal of Applied Sciences. 1(1), pp. 1-6. 2006.
- (108) Kjellsen, K .O. "Heatcuring and post curing regimes of high performance concrete: influence on microstructure and C-S-H composition." Cement and Concrete Research. 26(2), pp. 295-307. 1996. DOI: 10.1016/0008-8846(95)00202-2.
- (109) EFNARC "Specification and guidelines for self- compacting concrete." 2002, pp. 29-35. [Online]. Available from: <http://www.efnarc.org/pdf/SandGforSCC.PDF> [Accessed: February 2002].
- (110) ASTM C642 "Standard test method for specific gravity, absorption, and voidsinhardenedconcrete." AnnualBook of ASTM Standards, 04.02 Concrete and ConcreteAggregate. 1993.

